# الطاقة الشمسية

## من النشأة العالمية إلى الريادة الأردنية



تأليف
اسلام المناصير

# الطاقة الشمسية من النشأة العالمية الى الريادة الأردنية


رقم الايداع لدى دائرة المكتبة الوطنية (2026/5/2988)

| | |
|---|---|
| **عنوان الكتاب** | الطاقة الشمسية من النشأة العالمية الى الريادة الأردنية |
| **تأليف** | المناصير ، اسلام نصر عبد الله |
| **بيانات النشر** | البلقاء : اسلام نصر عبد الله المناصير ، 2026 |
| **الوصف المادي** | 138 صفحة . |
| **رقم التصنيف** | 333.7923 |
| **الواصفات** | الطاقلة الشمسية //موارد الطاقة المتجددة //هندسة الطاقة //اقتصاديات الطاقة// الأردن/ |
| **الطبعة** | الطبعة لاولى |

يتحمل المؤلف كامل المسؤلية القانونية عن محتوى مصنفه ولايعبر هذا عن رأئي الدائرة المكتبة الوطنية أو أي جهة حكومية أخرى .





ISBN

9 789923 025376

# الفهرس

# المقدمة

الحمد لله الذي جعل في الشمس سراجاً وهاجاً، وسخر لنا من العلم ما نذلل به الصعاب؛ أما بعد، فيسرني أن أضع بين يدي القارئ هذا العمل الذي يستعرض رحلة الطاقة الشمسية من جذورها التاريخية ومحطاتها العالمية الأولى وصولاً إلى مرحلة الريادة الأردنية التي نعيشها اليوم. لقد كانت صياغة هذا الكتاب رحلة بحثية ممتعة، حاولنا من خلالها شمول كافة مراحل نشأة هذا المجال وتطوره، مع التركيز على نقل خبرات ومعلومات قيمة تخدم المتخصص والطموح على حد سواء، ليكون هذا المحتوى مرجعاً يربط بين المسارات التقنية والرؤى الاستراتيجية لمستقبل الطاقة في مملكتنا حتى عام 2030.

إن هذا الكتاب هو نتاج بحث دؤوب وجهود ذاتية مخلصة، حيث اعتمدنا في بناء فصوله ورسم خارطته المعرفية على مجموعة متنوعة وموثوقة من المراجع العالمية والمحلية، لضمان تقديم مادة علمية تتسم بالدقة والرصانة. ونود التأكيد هنا على أن كافة الصور والرسومات التوضيحية المرفقة قد تم اختيارها بعناية فائقة لغايات تعليمية بحتة، تهدف إلى تبسيط المفاهيم الفنية وتعميق الفهم البصري للمحتوى، مع الالتزام التام بالأمانة العلمية في صياغة كافة الأفكار والمعلومات، بعيداً عن أي اقتباس غير موثق، ليكون هذا الكتاب بصمة مهنية تعكس اعتزازنا بمنجزاتنا الوطنية وتطلعاتنا نحو غدٍ أخضر ومستدام.

# الجذور التاريخية لطاقة الشمسية

عندما يتبادر إلى أذهاننا مصطلح "الطاقة الشمسية"، غالباً ما تنصرف الظنون نحو الألواح الزرقاء اللامعة، والتقنيات السيليكونية المعقدة، والاكتشافات المختبرية المعاصرة. لكن الحقيقة الكامنة خلف هذا المشهد الحديث تضرب بجذورها في عمق التاريخ الإنساني؛ فما نراه اليوم من نهضة تقنية ليس إلا ثمرة لبذور غرسها الأقدمون قبل آلاف السنين.

لقد أدركت الحضارات القديمة من فراعنة النيل إلى حكماء اليونان ومهندسي الرومان وصولا إلى مبتكري الصين أن الشمس ليست مجرد جرم سماوي للإنارة، بل هي مصدر طاقة لا ينضب. ورغم شح الموارد التكنولوجية بمفهومها الحالي،الا أنهم قدموا حلولا تعد اليوم "إعجازاً علمياً" بكل المقاييس؛ حيث استطاعوا تطويع الضوء والحرارة لتلبية احتياجاتهم الحياتية من تدفئة وإنارة بل وحتى تطبيقات صناعية بدائية.

إن ما ندرسه اليوم من قوانين في الإشعاع الشمسي والتوجيه الهندسي للمباني، ما هو إلا تطوير لأسس وضعها هؤلاء الرواد بذكاء فطري ومراقبة دقيقة للطبيعة. في هذا الكتاب، سنبحر

سوياً لنستعرض كيف تحولت "الابتكارات البدائية" إلى "ثورات تكنولوجية"، وكيف مهدت الحضارات القديمة الطريق أمامنا لنصل إلى ما نحن عليه الآن من كفاءة واستدامة، مؤكدين أن المستقبل الذي ننشده للطاقة النظيفة له تاريخ عريق يستحق التقدير والدراسة.

## المصريون القدماء رواد هندسة الطاقة الشمسية الأوائل

لم تكن علاقة المصريين القدماء بالشمس مجرد علاقة عقائدية، بل كانت علاقة هندسية وتقنية سابقت عصرها بآلاف السنين. ويمكن تلخيص براعتهم في استغلال الطاقة الشمسية في ثلاثة محاور رئيسية:

### 1.الهندسة المعمارية الحرارية (التدفئة والتبريد السلبي)

اعتمد المصريون مفهوم "الكتلة الحرارية" قبل صياغته علمياً بقرون، وتجلى ذلك في:

**التخزين الحراري:** تصميم الجدران والمباني بقدرة عالية على امتصاص حرارة الشمس نهاراً وتخزينها، ثم إعادة إشعاعها لتدفئة المنازل ليلاً.

**التنظيم الذاتي:** لم تقتصر تقنياتهم على التدفئة، بل ساعد تصميم الفتحات واختيار مواد البناء في الحفاظ

على برودة المنازل خلال ساعات الظهيرة القاسية، مما يمثل أول نموذج لنظم إدارة الطاقة المبنية.

**2.نظم تسخين المياه (البرك الشمسية)**

ابتكر القدماء طريقة ذكية لجمع الطاقة الحرارية تُعرف "بجمع الطاقة الشمسية"

كانوا ينشئون بركاً مائية مبطنة باللون الأسود لزيادة معامل امتصاص الأشعة الشمسية لأقصى درجة.

استخدموا نظام أنابيب بدائياً لضخ المياه الساخنة من هذه البرك وتمريرها داخل القصور والمنازل، وهو ما يشبه تماماً مبدأ عمل "السخانات الشمسية" في عصرنا الحالي.

**3.الاكتشاف المذهل الخلايا الشمسية البدائية**

تشير الأبحاث الحديثة (مثل دراسات جامعة جونز والتقارير المنشورة في المجلة الدولية للآثار) إلى احتمالية وصول المصريين لشكل بدائي من الخلايا الكهروضوئية

استخدام حجر **السج (الأوبسيديان):** وهو زجاج بركاني غني بالسليكون والبورون (العناصر الأساسية في صناعة الألواح الشمسية الحديثة).

**توليد التيار:** عُثر على قطع من "حجر السج" مطعمة بأسلاك نحاسية دقيقة ومسحوبة يدوياً، وأثبتت التجارب المخبرية أنها تولد تياراً كهربائياً بسيطاً عند تعرضها لضوء الشمس.

**التطبيقات المحتملة:** يُعتقد أن هذه الخلايا البدائية استُخدمت في عمليات "الطلاء الكهربائي" للمعادن أو توفير إضاءة خافتة في المعابد المظلمة.




**صورة توضيحية(١)**

## خلاصة تاريخية

"المملكة المصرية القديمة امتلكت المبادئ الأساسية للخلية الشمسية قبل أكثر من 4500 عام، ، مما يضعهم كأول أمة في التاريخ تضع حجر الأساس لعلوم الطاقة الشمسية."

# الإغريق رواد التخطيط الحضري الشمسي والعدسات الحارقة

## العمارة الشمسية السلبية

واجه الإغريق في القرن الخامس قبل الميلاد نقصاً حاداً في الوقود الخشبي، مما دفعهم لابتكار حلول معمارية تعتمد كلياً على الشمس. وقد تطور التخطيط الحضري لمدن كاملة مثل "أولينثوس" و"برييني" لضمان وصول أشعة الشمس لكل منزل. استندت فلسفتهم المعمارية إلى توجيه الواجهات الرئيسية للمباني نحو الجنوب، وهو ما وصفه "سقراط" بدقة حين أشار إلى أن المنازل الجنوبية تسمح لأشعة الشمس الشتوية بالتعمق داخل الأروقة لتوفير الدفء، بينما تظل مظللة وباردة في الصيف نظراً لارتفاع مسار الشمس فوق الأسطح.



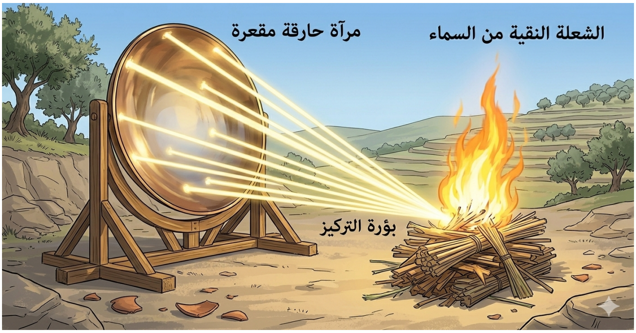

صورة توضيحية (٢)

## التخطيط المدني وحقوق الضوء

لم يقتصر ذكاء الإغريق على بناء المنازل المنفردة، بل امتد ليشمل "التنظيم الحضري المتعامد"؛ حيث صُممت الشوارع والمباني بحيث لا يحجب أي بناء جنوبي أشعة الشمس عن المنازل التي تقع خلفه، وهو ما يمثل أول نموذج تاريخي لما يُعرف "بحقوق الوصول إلى الضوء". كما استخدموا مواد بناء ذات كتلة حرارية عالية مثل الحجر لتخزين الحرارة نهاراً، وعزلوا الجدران الشمالية المواجهة للرياح الباردة لتقليل الفقد الحراري.

## "المرايا الحارقة" والابتكارات البصرية

استخدم الإغريق عاكسات مقعرة ومرايا نحاسية مصقولة لتركيز أشعة الشمس وتوليد درجات حرارة عالية، واستُخدمت هذه "المرايا الحارقة" في إيقاد النيران للطهي وفي الطقوس الدينية. وقد وصف الفيلسوف "بلوتارخ" هذه العملية بأنها استمداد لـ "اللهب النقي" مباشرة من السماء. وتعد أبحاث "دوسيثيوس" حول المرايا المكافئة (Parabolic Mirrors) قفزة نوعية؛ إذ أثبتت قدرتها على توليد حرارة أعلى بكثير من المرايا الكروية العادية.




**صورة توضيحية (٣)**

## أسطورة أرخميدس والدفاع الشمسي

تخلد النصوص التاريخية قصة العالم "أرخميدس" في حصار "سيراكوز" (212 ق.م)، حيث زُعم أنه استخدم دروعاً معدنية مصقولة كعدسات ضخمة لتركيز أشعة الشمس على سفن الأسطول الروماني وإشعال النيران فيها. ورغم الجدل العلمي حول إمكانية إحراق السفن بالكامل بهذه الطريقة، إلا أن تجارب حديثة (مثل تجربة معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا MIT) أثبتت أن تركيز الأشعة بمرايا متعددة يمكنه فعلياً رفع درجة حرارة الخشب إلى أكثر من 700 درجة فهرنهايت، مما يؤدي إلى تفحمه وإصدار الدخان، فضلا عن قدرته المؤكدة على إعاقة بصر الأعداء وتشتيتهم.




**صورة توضيحية(٤)**

## تطور استخدام الطاقة الشمسية في الحضارة الرومانية

تعد الحضارة الرومانية نموذجاً تاريخياً مبهراً في "الاستدامة الاضطرارية" والذكاء الهندسي؛ فبينما كانت الشعوب الأخرى ترى في الشمس مجرد مصدر للضياء، نجح الرومان في تحويل أشعتها إلى مورد طاقة حيوي يدير مفاصل حياتهم اليومية. لقد أدرك المهندسون الرومان، مدفوعين بتناقص الموارد الخشبية وتوسع الإمبراطورية، أن الشمس هي "الوقود المجاني" الذي يمكنه تدفئة المنازل وتسخين الحمامات العامة الضخمة، مما جعلهم يبتكرون أولى تقنيات العمارة الشمسية السلبية في التاريخ.

### 1. البداية والارتباط بالهندسة العسكرية

بدأ الاهتمام الروماني بالطاقة الشمسية من خلال الاحتكاك بالحضارة اليونانية.

دور "فيتروفيو": نقل المهندس الروماني الشهير فيتروفيو فكرة "منازل الطاقة الشمسية" من اليونان أثناء حملاته العسكرية، ودوّنها في كتابه الشهير عن العمارة، مما جعلها مرجعاً أساسياً للبناء الروماني.

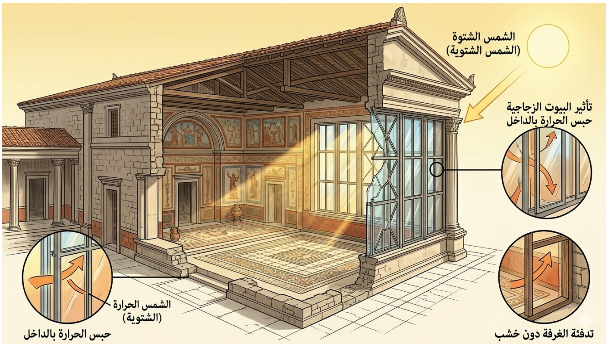
### 2. العمارة الشمسية السلبية (Passive Solar Design)

برع الرومان في تصميم المباني بحيث تعمل كجامعات طبيعية للحرارة:

التوجيه الذكي صممت المنازل والحمامات العامة لتواجه شمس الظهيرة في الشتاء (الاتجاه الجنوبي)، لضمان أقصى استفادة من الضوء والدفء.

**غرف "الهليوكامينوس" (Heliocaminus):** وهي غرف مخصصة داخل الحمامات صُممت لتكون بمثابة "صوبات زجاجية" طبيعية، حيث يتم تسخينها بالكامل عبر أشعة الشمس.

الكتلة الحرارية استخدموا مواد بناء مثل الحجر والخرسانة الرومانية لامتصاص الحرارة نهاراً وتخزينها، ثم إعادة إشعاعها ليلا لتدفئة المكان.




**صورة توضيحية (٥) غرفة الهيلوكامينوس**

## 3. الابتكارات التقنية: الزجاج والميكا

أضاف الرومان لمسة تقنية حاسمة ميزتهم عن الإغريق

حبس الحرارة استخدموا ألواح الميكا الشفافة والزجاج لتغطية النوافذ الكبيرة، مما سمح بمرور الضوء وحبس

الحرارة بالداخل (تأثير البيوت الزجاجية)، وهو ما قلل الحاجة لحرق الأخشاب بشكل كبير.

**4. التشريعات القانونية وحماية "الحق في الشمس"**

لم يتوقف الأمر عند الهندسة، بل وصل إلى التنظيم المدني

قوانين جستنيان تضمنت القوانين الرومانية نصوصاً صريحة تضمن أحقية الوصول إلى ضوء الشمس.

منع حجب الضوء كان يُمنع الجيران من بناء مبانٍ تحجب أشعة الشمس عن المنازل المجاورة، وكان القضاة يفصلون في مقدار الضوء الذي يحق لصاحب المنزل توقعه بشكل معقول.

**5.الأهداف الاقتصادية والبيئية**

كان الدافع وراء هذا التوجه يتجاوز الرفاهية إلى الضرورة

مواجهة ندرة الوقود مع التوسع العمراني والإسراف في قطع الأشجار، أصبحت الأخشاب نادرة ومكلفة، فكان اللجوء للشمس هو الحل الأمثل لتسخين الحمامات الضخمة وغرف البخار دون تكلفة وقود إضافية.

خلاصة القول الرومان لم يستخدموا الشمس كمصدر للضوء فحسب، بل حولوها إلى نظام تدفئة مركزي

مجاني، ووضعوا لها تشريعات تضمن استدامتها، مما يجعلهم من رواد "العمارة الخضراء" في التاريخ القديم.

## الحضارة الصينية هندسة الشمس وتخطيط المدن المستدام

لم يكن اهتمام الصينيين بالشمس مجرد طقوس عقائدية، بل كان ضرورة حيوية فرضتها الطبيعة، خاصة في الأقاليم الشمالية الباردة. وقد تجلى هذا الاهتمام في ثلاثة محاور رئيسية:

### 1. العمارة الشمسية الفطرية (ما قبل التاريخ)

بدأت بوادر استخدام الطاقة النظيفة في المساكن الصينية منذ عصور ما قبل التاريخ، حيث اعتمد البناء على مبادئ فطرية ذكية

**التوجيه الاستراتيجي:** كانت الفتحة الوحيدة للمنزل تفتح دائماً جهة الجنوب، وذلك لصد الرياح الشمالية الباردة والاستفادة من أشعة الشمس المنخفضة في فصل الشتاء لتدفئة الداخل.

**الإظلال الموسمي:** برع الصينيون في تصميم أسقف القش بحواف ممتدة وتدلية مدروسة (Overhangs)؛ حيث تسمح هذه الحواف بدخول شمس الشتاء المائلة،

بينما تعمل كمظلات تمنع أشعة الشمس العمودية الحارقة من دخول المنزل صيفاً.

## 2. التخطيط الحضري ومنطق الشوارع (2000 ق.م)

انتقلت العمارة من الفكر الفردي إلى التنظيم المدني الشامل. فبحلول عام 2000 قبل الميلاد، أدرك الصينيون أن الاستفادة القصوى من الشمس تتطلب تنظيماً جماعياً

**محور شرق-غرب:** صممت شوارع المدن لتمتد حصراً من الشرق إلى الغرب. هذا التخطيط الهندسي يضمن أن كل مبنى يقع على الشارع يمتلك واجهة عريضة مواجهة للجنوب، مما يسمح بامتصاص أقصى طاقة حرارية ممكنة.

**التناظر والدقة:** وصف الرحالة "غابرييل دي ماغالهايس" مدينة بكين في القرن السابع عشر بأنها صُممت "بخط ومسطرة"، حيث كانت الشوارع مستقيمة وطويلة لضمان التناسق الشمسي لجميع القصور والمنازل بلا استثناء.

**مفهوم الفناء الجنوبي:** اعتمدت العمارة التقليدية وجود فناء مفتوح يقع جنوب الغرف الرئيسية مباشرة، ليكون بمثابة "خزان حراري" يمد الغرف بالضوء والدفء.

### 3. ابتكارات كفاءة الطاقة والتدفئة (الكانغ والمرايا)

لم يكتفِ الصينيون بتوجيه المباني، بل ابتكروا أنظمة داخلية لترشيد الاستهلاك الحراري

**سرير "الكانغ" (Kang) :** منصة بناء من مواد ذات كتلة حرارية عالية (تمتص الحرارة وتشعها ببطء). كان يتم ربط مدخنة الموقد بجسم السرير، بحيث تمر الحرارة المهدرة من الطهي تحت السرير لتدفئته، مما يضمن بقاء النائمين في دفء طوال الليل بأقل كمية وقود.

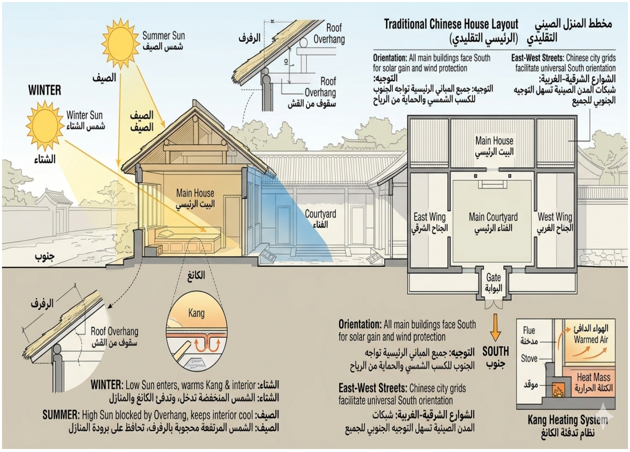
**المرايا الشمسية (20م):** وثقت السجلات التاريخية استخدام المرايا البرونزية لتركيز الضوء وتوجيهه، وهو تطور تقني تزامن مع مفاهيم "الغرف الشمسية" التي انتشرت في العالم القديم (بما في ذلك الحمامات الرومانية).

### 4. الفلسفة والمكانة الرمزية للجنوب

تحول الاتجاه الجنوبي من حاجة فيزيائية إلى مكانة سياسية وروحيّة

**الجنوب رمز الإشراق:** ارتبط الجنوب في الحكمة الصينية بالنار والنور والدفء، بينما ارتبط الشمال بالكآبة والظلام.

**بروتوكول الإمبراطور:** فرضت الطقوس على الإمبراطور أن يواجه الجنوب عند استقبال الرعية، تعبيراً عن تبنيه للنور والوضوح في حكمه واجتنابه للظلام.




**صورة توضيحية (٦)**

إن تفضيل الصينيين للواجهة الجنوبية حتى يومنا هذا ليس مجرد تمسك بالتقاليد، بل هو نتاج آلاف السنين من الدراسة المنهجية لحركة الأرض والشمس، مما جعل من مدنهم القديمة والحديثة نموذجاً يحتذى في استغلال الطاقة المجانية وتطويع البيئة لصالح الإنسان.

## شعب الأنسازي رواد هندسة العمارة الشمسية السلبية

استوطن شعب "الأنسازي" (أسلاف البويبلو) مناطق الجنوب الغربي للولايات المتحدة (كولورادو ونيومكسيكو) في الفترة ما بين (750 - 1300م). وتعد حضارتهم نموذجاً تاريخياً فريداً في تطبيق مبادئ "العمارة المناخية"، حيث نجحوا في تطويع الموارد الطبيعية لتحقيق كفاءة طاقة عالية دون أي وسائل ميكانيكية.

## الاستغلال الجيومورفولوجي للمنحدرات (Cliff Dwellings)

اعتمد الأنسازي في بناء مدنهم (مثل موقع "ميسافيردي") على التجاويف الصخرية الطبيعية، مع مراعاة التوجيه الجغرافي الدقيق

**التوجيه نحو الجنوب:** صُممت المستوطنات لتواجه الجنوب تماماً، وهو توجيه استراتيجي لاستقبال أقصى إشعاع شمسي ممكن.

**التحكم في زوايا السقوط (Solar Geometry):** استغل المعماري القديم نتوءات الصخور العلوية (Overhangs) لتعمل كمظلات طبيعية؛ ففي الصيف عندما تكون زاوية ارتفاع الشمس عمودية،

تحجب هذه النتوءات الأشعة عن المباني للحفاظ على برودتها. أما في الشتاء، وبسبب انخفاض زاوية الشمس في الأفق، تتغلغل الأشعة بعمق تحت الصخور لتصطدم بجدران المنازل وتوفر تدفئة طبيعية.

### توظيف الكتلة الحرارية (Thermal Mass)

استخدم الأنسازي مواد بناء محلية ذات سعة حرارية عالية (High Heat Capacity) مثل الحجر والطين (الأدوبي)

**تأخير التدفق الحراري (Thermal Lag):** تعمل هذه الجدران السميكة كخزان للطاقة؛ حيث تمتص الإشعاع الشمسي نهاراً وتخزنه، ثم تبدأ بإعادة إشعاعه نحو الفراغات الداخلية خلال ساعات الليل الصحراوي البارد. هذا النظام يقلل من التذبذب الحراري داخل المسكن، وهو المبدأ الأساسي الذي تقوم عليه المباني المستدامة حديثاً.

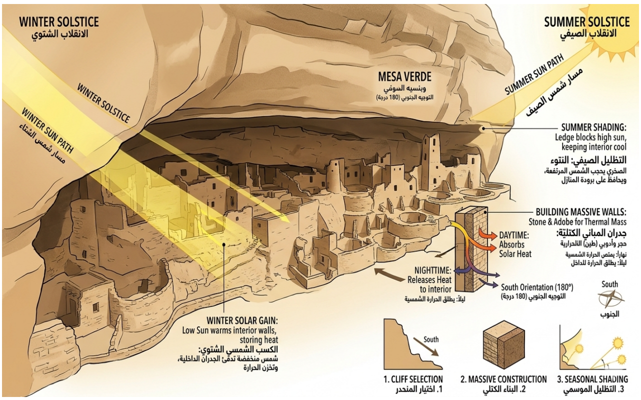
### التنظيم الحضري وحقوق الارتفاق الشمسي

لم تكن المباني مجرد كتل عشوائية، بل صُممت بنظام التراجع المتدرج (Step-back Design)

**منع التظليل البيني:** بفضل البناء المتدرج نحو الخلف والأعلى، ضَمِن الأنسازي وصول ضوء الشمس لكل طابق وكل وحدة سكنية دون أن يحجب مبنى ظلَّه عن

الآخر. يمثل هذا التصميم وعياً مبكراً بما نسميه اليوم "حقوق الضوء" (Solar Rights) والتخطيط العمراني الشمسي.

إن ما حققه شعب الأنسازي في منحدرات 'ميسافيردي' ليس مجرد بناء لملاجئ صخرية، بل هو تجسيد حي لما نسميه اليوم (الهندسة المناخية). لقد أثبتت هذه الحضارة أن الفهم العميق لزوايا سقوط الشمس وخصائص المواد الحرارية يمكن أن يغني عن تعقيدات التكنولوجيا الحديثة في توفير بيئة عيش مريحة ومستدامة. تبقى عمارة الأنسازي شاهداً تاريخياً على أن أولى خطوات النجاح في أي مشروع طاقة هي التصميم الذكي المتوافق مع البيئة، وهو المبدأ الذي لا يزال يشكل حجر الزاوية في علوم الأبنية الخضراء والطاقة النظيفة حتى يومنا هذا.




**صورة توضيحية (٧) بناء حضارة الأنسازي والاستفادة من الطاقة الشمسية**

# الثروة التقنية ونشأة الأنظمة الحديثة

بعد قرون من الاعتماد على الوسائل البدائية، شهد العصر الحديث ولادة حقيقية لتقنيات تسخير الطاقة الشمسية، حيث انتقل الإنسان من مجرد المراقبة إلى هندسة الضوء والحرارة. يبحث هذا الفصل في مسارين متوازيين شكلا العمود الفقري لهذا التطور: المسار الحراري الذي بدأ بمحاولات طموحة لتركيز أشعة الشمس لتشغيل المحركات البخارية والآلات الضخمة، والمسار الضوئي الذي فك شفرة التفاعل بين الضوء والمادة.

سنستعرض هنا كيف تحولت النظريات الفيزيائية، بدءاً من اكتشاف التأثير الكهروضوئي وصولا إلى التفسيرات الكمومية للفوتونات، إلى واقع ملموس مع اختراع أول خلية شمسية سيليكونية. إنها رحلة تجمع بين عبقرية الابتكار وتحديات التطبيق، لنفهم كيف استطاع العلم تحويل "شعاع الشمس" من مصدر للدفء إلى تيار كهربائي يغذي حضارتنا المعاصرة.

## المسار الحراري نشأة المحطات الشمسية

بدأ الحلم الحديث لاستغلال الشمس ليس عبر الكهرباء، بل عبر "الحرارة الميكانيكية". ففي القرن التاسع عشر، وبينما كان العالم يغرق في دخان الفحم، ظهر المهندس الفرنسي أوغستين موشو (Augustin Mouchot) برؤية ثورية؛ حيث أدرك مبكراً أن الاعتماد على الوقود الأحفوري لن يدوم، وأن الشمس هي المصدر الحقيقي للطاقة.

## ابتكار موشو: المخروط الشمسي العاكس

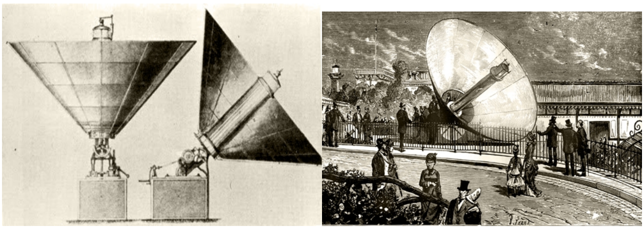
في عام 1866، نجح موشو في بناء أول محرك بخاري يعمل كلياً بالطاقة الشمسية. اعتمد مبدأ عمله على:

**التركيز البؤري:** استخدم مجمعاً ضخماً على شكل "مخروط مقلوب" مبطناً بصفائح من الفضة المصقولة لتعمل كمرآة عاكسة.

**المرجل الزجاجي:** في مركز هذا المخروط، وضع غلاية (مرجل) من النحاس المطلي باللون الأسود (لامتصاص أقصى قدر من الحرارة)، ومحاطة بغلاف زجاجي لخلق "تأثير الصوبة الزجاجية" ومنع فقدان الحرارة.

**توليد الحركة:** عند تركيز الأشعة، يغلي الماء داخل المرجل ويتحول إلى بخار بضغط عالٍ، ينتقل عبر أنابيب ليقوم بتحريك مكابس المحرك البخاري التقليدي.

بلغت ذروة نجاحه في معرض باريس العالمي عام 1878، حيث استطاع تشغيل آلة طباعة صحف ضخمة باستخدام أشعة الشمس فقط، مما أذهل الحضور بقدرة هذا "المخروط" على إنتاج طاقة حركية من الفراغ.



**صورة (٩/٨)مركز الطاقة الشمسية لأوغستين موشو في المعرض العالمي في باريس، 1878. ( المصدر )**

## جون إريكسون تطوير الكفاءة والتركيز الخطي

لم يتوقف الطموح عند موشو، ففي الولايات المتحدة، التقط الخيط المخترع الشهير جون إريكسون (John Ericsson). تميز إريكسون بنظرة أكثر اقتصادية، حيث رأى أن مخروط موشو مكلف ومعقد التصميم، فقام بابتكار

1. **المرايا القطعية (Parabolic Troughs):** بدلا من الشكل المخروطي، استخدم مرايا منحنية طولية تركز الضوء على أنبوب مركزي، وهو التصميم الذي يُعد الجد الشرعي لمحطات الطاقة الشمسية المركزة (CSP) التي نراها اليوم.

2. **المحرك الشمسي المباشر:** طور محركات تعمل بالهواء الساخن بدلا من البخار لتقليل مخاطر الضغط العالي وزيادة الكفاءة في المناطق الصحراوية.

بناءً على إرث "موشو" و"إريكسون"، حدثت القفزة النوعية التي نقلت الطاقة الشمسية من "تجارب فردية" إلى "محطات طاقة فعلية" منظمة. المحطة التي تعتبر الجد الشرعي لمحطات الطاقة الشمسية الحرارية (CSP) الحديثة هي محطة المعادي (Meadi Solar Plant) في مصر عام 1913.

## المحطة الأولى عالمياً مشروع "فرانك شومان" في المعادي (1913)

إذا كان موشو وإريكسون هم من وضعوا النظريات، فإن المهندس الأمريكي فرانك شومان (Frank Shuman) هو من بنى أول "نظام طاقة شمسية"

تجاري وضخم. وقد شمل تصميمه المحاور الرئيسية التالية:

## 1. عبقرية التصميم الهندسية

في عام 1913، في منطقة المعادي بالقرب من القاهرة، أنشأ شومان محطة تتكون من خمسة مجمعات شمسية ضخمة.

**المجمعات القطعية (Parabolic Troughs):** استلهم شومان فكرة إريكسون وطورها؛ حيث بلغ طول كل مجمع حوالي 62 متراً. كانت المرايا تركز أشعة الشمس على أنبوب امتصاص مركزي مصنوع من الحديد المصبوب.

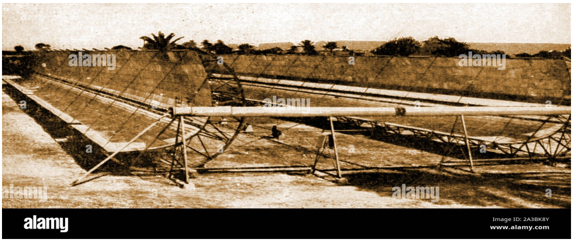
**نظام التتبع:** كانت هذه المجمعات تتحرك آلياً لتتبع مسار الشمس من الشروق إلى الغروب، وهو ما رفع الكفاءة بشكل مذهل مقارنة بالتجارب السابقة.

## 2. الغرض التشغيلي (مبدأ العمل):

المحطة لم تكن لتوليد الكهرباء (لأن عصر الخلايا لم يبدأ بعد)، بل كانت محطة ضخ مياه عملاقة.

كانت الطاقة الحرارية المركزة تغلي الماء لإنتاج بخار بضغط منخفض، والذي بدوره يشغل محركاً بقوة 55 حصاناً (HP).

كانت المحطة قادرة على ضخ 22,700 لتر من الماء في الدقيقة من نهر النيل لري حقول القطن المجاورة.



**صورة (١٠) محطة المعادي مشروع شومان فرانك 1913**

قال شومان جملته الشهيرة "The human race must finally utilize direct sun power or revert to barbarism"

"على الجنس البشري في نهاية المطاف أن يستغل طاقة الشمس المباشرة، أو سيعود إلى الهمجية".

بناءً على هذه السلسلة من الابتكارات، بدءاً من مخروط موشو الذي حبس الحرارة خلف الزجاج، مروراً بذكاء إريكسون في ابتكار المرايا القطعية الخطية، ووصولاً إلى عبقرية شومان في تشغيل أول محطة ضخ عملاقة في "المعادي"؛ استطاع العقل البشري وضع الحجر الأساس لما نعرفه اليوم بـ محطات الطاقة الشمسية المركزة (Concentrated Solar Power - CSP).

إن ما نراه اليوم في مشاريع عالمية ضخمة ـــمثل محطة "نور" في المغرب أو محطة "إيفانباه" في كاليفورنيا ـــ ليس إلا تطوراً هندسياً مباشراً لتلك المبادئ الأولى. فالمرايا التي كانت تُستخدم قديماً لتبخير الماء وتدوير المحركات البخارية البسيطة، أصبحت اليوم مصفوفات ذكية تتبع الشمس بدقة متناهية، لتركيز طاقتها في سوائل ناقلة للحرارة (كالزيوت الحرارية أو الأملاح المنصهرة)، مما يسمح بتوليد الكهرباء وتخزين الطاقة حتى بعد غياب الشمس.

لقد أثبت هؤلاء الرواد أن الشمس ليست مجرد مصدر للضوء، بل هي "مرجل كوني" لا ينضب، قادر على إدارة عجلة الصناعة والحضارة إذا ما أُحسنت هندسته.

## المسار الضوئي الثورة الضوئية (من النظريات إلى الخلية السيليكونية)

بينما كان العالم منشغلا في القرن التاسع عشر بمحاولة استغلال حرارة الشمس، كانت هناك تجارب صامتة تجري في المختبرات الفيزيائية ستغير وجه البشرية للأبد. لم يكن الهدف هذه المرة تسخين الماء، بل استخراج "الإلكترونات" مباشرة من المادة باستخدام الضوء.

## إدموند بيكريل (1839) الشرارة الأولى

بدأت الحكاية مع الفيزيائي الفرنسي الشاب إدموند بيكريل (Edmond Becquerel)، الذي اكتشف وهو في التاسعة عشرة من عمره فقط ظاهرة "التأثير الكهروضوئي الكيميائي" (Photovoltaic Effect).

**التجربة:** وضع بيكريل قطبين من الفضة في محلول موصل للكهرباء، ولاحظ بذهول أن التيار الكهربائي يزداد فور تعرض القطبين للضوء.

**الأهمية:** كانت هذه أول مرة يثبت فيها العلم إمكانية تحويل الضوء إلى كهرباء بشكل مباشر، ورغم أن الكفاءة كانت ضئيلة جداً، إلا أنها كانت "البيضة" التي خرجت منها كل تكنولوجيا الألواح الشمسية التي نراها اليوم.

## ويلوبي سميث (1873): اكتشاف السيلينيوم

بعد عقود، اكتشف المهندس الإنجليزي ويلوبي سميث (Willoughby Smith) خاصية "الموصلية الضوئية" لعنصر السيلينيوم (Selenium). وجد سميث أن مقاومة هذا العنصر تتغير عند تعرضه للضوء، مما فتح الباب أمام العلماء لمحاولة بناء أول "خلية شمسية صلبة" (بدون محاليل سائلة).

## تشارلز فريتس (1883) أول خلية شمسية في التاريخ

بناءً على اكتشاف سميث، قام المخترع الأمريكي تشارلز فريتس (Charles Fritts) بتغطية طبقة رقيقة من السيلينيوم بطبقة مجهرية من الذهب، لينتج أول خلية شمسية وظيفية في العالم. ورغم أن كفاءتها لم تتجاوز 1%، إلا أن فريتس كان متفائلا جداً لدرجة أنه تنبأ بأن هذه الخلايا ستحل يوماً ما محل محطات الفحم في المدن.

**التفسير الفيزيائي:** كيف يولد الضوء تياراً كهربائياً؟

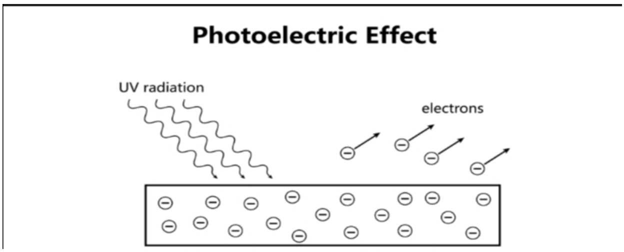
بعد تجارب "بيكريل" و"فريتس" الأولية، ظل السؤال المحير للعلماء كيف ينجح الضوء في تحريك الإلكترونات؟ جاءت الإجابة القاطعة عبر ثلاث محطات فيزيائية كبرى

## 1. ألبرت أينشتاين وتكميم الضوء (1905)

حدثت الانفراجة الكبرى عندما قدم أينشتاين ورقة بحثية فسر فيها "التأثير الكهروضوئي"، وهو الإنجاز الذي نال عليه جائزة نوبل لاحقاً.

**المبدأ:** أوضح أينشتاين أن الضوء ليس مجرد موجات، بل هو سيل من جسيمات طاقة تسمى "الفوتونات" (Photons).

**الفكرة الهندسية:** كل فوتون يحمل كمية محددة من الطاقة تعتمد على تردده. إذا كانت طاقة الفوتون كافية، فإنه عندما يصطدم بذرة المادة، يقوم "بضرب" أحد إلكتروناتها وتحريره من مداره.




**صورة(١١) تأثير الضوء على الالكترونات**

## 2. نظرية النطاق (Band Theory) وفجوة الطاقة

لكي يتحول هذا الإلكترون المحرر إلى "تيار كهربائي" مفيد، يجب أن نستخدم مواد خاصة تسمى أشباه الموصلات (Semiconductors) مثل السيليكون.

نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل: في أشباه الموصلات، توجد فجوة طاقة (Energy Gap) تفصل بين الإلكترونات المرتبطة بالذرة (نطاق التكافؤ) وبين المسار الذي يسمح لها بالحركة (نطاق التوصيل).

**دور الضوء:** عندما يمتص السيليكون فوتونات الشمس، تكتسب الإلكترونات طاقة كافية للقفز عبر هذه الفجوة نحو نطاق التوصيل، لتصبح "إلكترونات حرة" جاهزة للحركة.

### المحرك الداخلي (P-N Junction) الوصلة الثنائية

تحرير الإلكترونات وحده لا يكفي؛ بل نحتاج لـ "قوة دافعة" تجبرها على التدفق في اتجاه واحد لتكوين تيار. يتم ذلك عن طريق دمج نوعين من السيليكون:

**النوع (P):** غني بـ "الفجوات" الموجبة.

**النوع (N):** غني بـ "الإلكترونات" السالبة.

عند تلامسهما، ينشأ مجال كهربائي داخلي عند منطقة الاتصال. هذا المجال يعمل كـ "شرطي مرور"، حيث يدفع الإلكترونات المحررة بواسطة الضوء نحو جهة واحدة فقط، مما يجبرها على الخروج عبر الأسلاك الخارجية كتيار كهربائي مستمر (DC).

**المحطة الفاصلة:** خلية السيليكون في مختبرات "بل" (1954)

قبل هذا التاريخ، كانت الخلايا تعتمد على مادة "السيلينيوم" بكفاءة لا تتجاوز 1%. لكن الفريق في مختبرات بل أدرك أن السيليكون هو المفتاح الحقيقي لرفع الكفاءة بسبب خصائصه كمادة شبه موصلة فائقة الاستقرار.

## كيف تم إنشاء الخلية (الاعتبارات التقنية)

عند تصميم الخلية الأولى، واجه المهندسون تحديات هندسية حاسمة أخذوها بعين الاعتبار:

**عملية "التطعيم" (Doping):** أدرك الفريق أن السيليكون النقي لا يوصل الكهرباء بشكل جيد. لذا، قاموا بإضافة شوائب (مثل الفوسفور لإنشاء النوع N، والبورون لإنشاء النوع P). هذا التوازن الدقيق هو ما خلق "المجال الكهربائي الداخلي" اللازم لتحريك الإلكترونات.

**سماكة الطبقات:** كان عليهم جعل الطبقة العليا (P-layer) رقيقة جداً (بالميكرومتر) لضمان وصول الفوتونات إلى منطقة الوصلة (Junction) قبل أن تُفقد طاقتها.

**تقليل الانعكاس:** لاحظوا أن السيليكون يعكس الضوء كالمرآة، فاستخدموا طبقات طلاء بدائية لتقليل الفقد الناتج عن الانعكاس، وهو ما نراه اليوم باللون الأزرق أو الأسود للألواح.

## المبادئ الحسابية والفيزيائية (Formulas):

بناءً على هذه الخلية، بدأت تظهر الحسابات الأساسية التي ندرسها اليوم في هندسة الطاقة الشمسية:

### 1. كفاءة تحويل الطاقة (Efficiency - η)

تُحسب الكفاءة من خلال نسبة الطاقة الكهربائية القصوى التي تنتجها الخلية إلى إجمالي طاقة الإشعاع الشمسي الساقط عليها.

المعادلة

Efficiency (η) = (Pmax) / (Pin * A)

حيث أن

Pmax: أقصى قدرة كهربائية ناتجة من الخلية واط.

Pin: شدة الإشعاع الشمسي الساقط واط/متر مربع.

A: مساحة سطح الخلية المعرض للشمس متر مربع.

## 2. عامل الملء (Fill Factor - FF)

هو مقياس لجودة الخلية ومدى اقتراب أداء الوصلة الثنائية من الحالة المثالية، ويُعبر عن العلاقة بين القدرة الفعلية والقدرة النظرية القصوى.

المعادلة

Fill Factor (FF) = (Vmp * Imp) / (Voc * Isc)

حيث أن

Vmp: الجهد عند نقطة الطاقة القصوى (فولت)

Imp: التيار عند نقطة الطاقة القصوى (أمبير)

Voc: جهد الدائرة المفتوحة (Open Circuit Voltage).

Isc: تيار القصر (Short Circuit Current)

## 3. تيار الضوء (Photocurrent - Iph)

يعتمد التيار الناتج بشكل مباشر على عدد الفوتونات الساقطة، ويُحسب تقريبياً بالعلاقة

المعادلة

Iph = q * G * (Ln + Lp)

حيث أن

شحنة الإلكترون الثابتة :q

معدل توليد الأزواج إلكترون-فجوة نتيجة الضوء :G

طول انتشار الناقلات إلكترونات وفجوات :Ln & Lp داخل المادة شبه الموصلة

توظيف الفكرة في الأنظمة الفعلية الحالية:

انتقلت الفكرة من المختبر إلى الواقع عبر مراحل جعلتها أساس أنظمتنا الحالية

**التطبيقات الفضائية:** كان أول استخدام فعلي عام 1958 لتزويد الأقمار الصناعية (مثل Vanguard 1) بالطاقة، لأن تكلفة الخلايا كانت باهظة جداً للاستخدام المنزلي آنذاك.

**التوصيل على التوالي والتوازي:** تم استلهام فكرة "المصفوفة" (Array) عبر ربط هذه الخلايا الصغيرة معاً لرفع الجهد (توالي) والتيار (توازي).

**الاستدامة التجارية:** أدى تطوير طرق إنتاج السيليكون (مثل طريقة تشوخرالسكي Czochralski) إلى خفض التكاليف، مما سمح بتحويل "خلية مختبرات بل"

إلى "لوح شمسي" فوق أسطح المنازل وفي المحطات الكبرى.

## من المختبر إلى الواقع ولادة أول نظام كهروضوئي متكامل

بعد نجاح "مختبرات بل" في تطوير الخلية المنفردة، واجه المهندسون التحدي الأكبر كيف نحول هذه القطعة الصغيرة إلى نظام طاقة يعتمد عليه؟ هنا بدأت رحلة ابتكار "الأنظمة الشمسية" بمفهومها الشامل الذي نطبقه اليوم في مشاريعنا الهندسيّة.

### 1. أول نظام شمسي تجاري (ريف جورجيا - 1955)

بعد عام واحد فقط من اختراع الخلية، نُفذ أول نظام فعلي في بلدة "أميريكوس" بولاية جورجيا لتشغيل معدات تقوية إشارات الهاتف الريفية.

**المصفوفة (The Array):** تم تجميع الخلايا في وحدات أكبر (Module) لرفع الجهد.

**نظام التخزين (Battery Storage):** ولضمان استمرارية الخدمة ليلاً، تم ربط الألواح ببطاريات

رصاص حامضية لتخزين الطاقة، وهو ما وضع حجر الأساس لأنظمة (Off-Grid) التي نصممها اليوم.




**صورة (١٢)تطبيق تجاري للخلايا الشمسية في جورجيا 1955، أرشيف مختبرات بيل"**

## 2. محطة "لوغو" (Lugo) والتحول لأنظمة الشبكة (1982)

تعتبر محطة "لوغو" في كاليفورنيا الجد الشرعي لمحطات الطاقة الشمسية الحالية، حيث كانت أول محطة بقدرة 1 ميغاواط ترتبط بالشبكة العامة. في هذا المشروع، تبلورت المكونات الأساسية للنظام:

**المحولات (Inverters):** استُخدمت محولات ضخمة لتحويل التيار المستمر (DC) الناتج من الألواح إلى تيار متردد (AC) يتوافق مع الشبكة.

**أنظمة التتبع (Tracking Systems):** أُضيفت محركات ميكانيكية لتحريك المصفوفات مع مسار الشمس لرفع الإنتاجية بنسبة تصل إلى 30%، وهو المبدأ الذي نستخدمه حالياً في المحطات الكبرى لتقليل تكلفة الطاقة المستخرجة (LCOE).

## 3. تطور الكفاءة والمكونات في الأنظمة الحالية

انتقلنا من أنظمة بدائية بكفاءة إجمالية لا تتعدى 2%، إلى أنظمة ذكية تتجاوز كفاءة ألواحها اليوم 22% وتصل كفاءة محولاتها (Inverters) إلى 98%. البحث لم يتوقف عند هذا الحد؛ فالعالم اليوم يتسابق لدمج الذكاء الاصطناعي في "المحولات الذكية" وتقنيات النانو في "الخلايا الترادفية" (Tandem Cells) لكسر حواجز الكفاءة الحالية والوصول بها إلى مستويات غير مسبوقة.

إن ما بدأ كتجارب مخبرية خجولة في القرن التاسع عشر، وما تلاه من اختراع أول خلية سيليكونية في "مختبرات بل" بكفاءة لم تتجاوز 6%، لم يكن مجرد ابتكار تقني، بل كان إعلانًا عن بزوغ عصر "الحضارة الشمسية". تلك الخلية اليتيمة التي كانت تُعتبر باهظة الثمن ومخصصة فقط لغزو الفضاء، أصبحت اليوم هي الحجر الأساس في أمن الطاقة العالمي.

لقد قطعنا شوطاً مذهلاً؛ فالأنظمة الفعليه الحالية التي نراها فوق أسطح المنازل وفي المحطات الميغاواتية، لم تعد تكتفي بتلك الأرقام البسيطة. بفضل التطور في علوم المواد وهندسة التصنيع، نشهد اليوم ألواحاً تجارية تتجاوز كفاءتها 22%، بل ووصلت في المختبرات المتقدمة باستخدام تقنيات "الخلايا الترادفية" (Tandem Cells) إلى كفاءات تتخطى حاجز 30% و 40%.

إلا أن القصة لم تنتهِ هنا؛ فما زال البحث العلمي في سباق مع الزمن. العالم اليوم لا يتوقف عن الابتكار، والمهندسون والعلماء يعملون ليل نهار لتطوير مواد جديدة مثل "البيروفسكايت" وتقنيات النانو، بهدف الوصول إلى ألواح شمسية أكثر مرونة، وأقل تكلفة، وأعلى كفاءة.

إننا نعيش في عصر ذهبي للطاقة المتجددة، حيث تحول "الحلم الحراري" لـ "موشو" و"الشرارة الضوئية" لـ "بيكريل" إلى واقع يغذي المدن ويدفع عجلة الصناعة، وما زال المستقبل يخبئ الكثير من المفاجآت في جعبة هذا الإشعاع القادم من السماء.

# اقتصاد الشمس وحاجة العصر

لم تعد الطاقة الشمسية في وقتنا الراهن مجرد خيار بيئي بديل أو تجربة علمية محدودة، بل تحولت إلى ركيزة أساسية في بناء الاقتصادات الحديثة وسد الفجوات المتزايدة في احتياجات الطاقة العالمية. إنها الطاقة الدائمة التي لا تنضب، والتي أثبتت عبر السنين جدواها كحل استراتيجي يجمع بين الاستدامة والمصلحة الاقتصادية العليا للدول.

لقد انتقل العالم اليوم إلى مرحلة "النهضة الشمسية"، حيث أصبح سوق الطاقة الشمسية من أكبر وأسرع الأسواق نمواً في الاقتصاد العالمي. ومع توجه الأنظار نحو تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، انتشرت أنظمة الطاقة الشمسية وتطبيقاتها بشكل هائل، متجاوزةً حدود الاستخدامات البسيطة لتصبح جزءاً أصيلاً من البنية التحتية القومية للدول. هذا التوسع لم يساهم فقط في تأمين مصادر طاقة نظيفة، بل كان له أثر مباشر في خفض التكاليف الإنتاجية، وخلق فرص عمل جديدة، وتعزيز الاستقرار الاقتصادي للدول التي استثمرت بذكاء في هذا القطاع.

في هذا الفصل، سنبحر في جولة تحليلية لاستكشاف كيف تحولت هذه الطاقة من "مشروع تقني" إلى "محرك اقتصادي" جبار. سنستعرض تجارب دول

رائدة استطاعت بفضل رؤيتها الاستراتيجية أن تجعل من الشمس مصدراً للثروة قبل الطاقة، وسنتوقف بشكل مفصل عند "العملاق الصيني"؛ ذلك اللاعب الاستراتيجي الذي تمكن من السيطرة على موازين القوى في سوق الطاقة المتجددة. سنبحث في كيفية تحكم الصين في سلاسل التوريد العالمية، والآثار الاقتصادية العميقة التي حققتها من خلال مشاريعها العملاقة وتطبيقاتها المبتكرة، مما جعلها الرقم الأصعب والنموذج الأبرز في ريادة هذا القطاع عالمياً.

## ألمانيا رائدة "التحول الطاقي" ونموذج السيادة الشمسية

لا يمكن الحديث عن اقتصاد الشمس دون الوقوف طويلا عند التجربة الألمانية، التي تُعد المختبر العالمي الأول لسياسات "التحول الطاقي" (Energiewende). ففي عام 2025، رسّخت ألمانيا مكانتها ليس فقط كدولة مهتمة بالبيئة، بل كقوة اقتصادية تعتمد على الشمس كأحد أعمدة أمنها القومي وقاعدتها الإنتاجية.

## قفزة عام 2025: لغة الأرقام تتحدث

لم يكن عام 2025 مجرد عام اعتيادي، بل شهد قفزة غير مسبوقة في إنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية. وبحسب بيانات معهد فراونهوفر لأنظمة الطاقة الشمسية (Fraunhofer ISE) والاتحاد الألماني لصناعة الطاقة الشمسية (BSW-Solar)، يمكننا تلخيص هذا الإنجاز الاقتصادي في النقاط التالية:

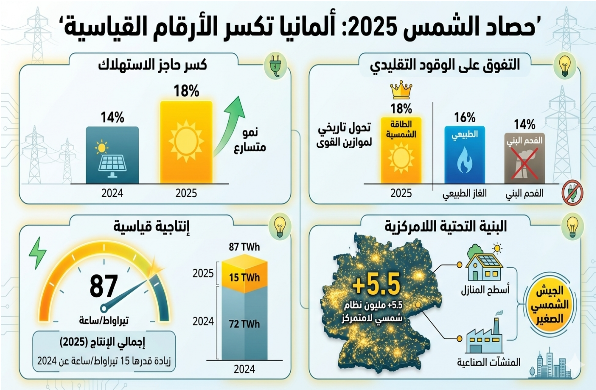
**كسر حاجز الاستهلاك:** ارتفعت حصة الطاقة الشمسية من إجمالي استهلاك الكهرباء في ألمانيا لتصل إلى نحو 18%، مقارنة بـ 14% في العام الذي سبقه، مما يعكس وتيرة نمو متسارعة جداً.

**التفوق على الوقود التقليدي:** في تحول تاريخي لموازين القوى الطاقية، تجاوزت حصة الشمس في عام 2025 مصادر تقليدية كبرى؛ حيث تفوقت على الفحم البني (14%) والغاز الطبيعي (16%).

**إنتاجية قياسية:** حققت ألمانيا إنتاجاً تجاوز 87 تيراواط/ساعة، بزيادة قدرها 15 تيراواط/ساعة عن عام 2024، وهو رقم قياسي يعكس كفاءة الاستثمار في هذا القطاع.

**البنية التحتية اللامركزية:** لم تكتفِ ألمانيا بالمحطات الكبرى، بل اعتمدت على "الجيش الشمسي الصغير"؛

حيث توزعت هذه الإنتاجية عبر أكثر من 5.5 مليون نظام شمسي مثبتة على أسطح المنازل والمنشآت الصناعية.




**صورة(١٣)**

## لماذا نجحت ألمانيا اقتصادياً في هذا الملف؟

إن هذا النجاح لم يكن وليد الصدفة، بل جاء نتيجة تظافر عدة عوامل استراتيجية:

تبسيط إجراءات الترخيص: تسريع الدورة المستندية للمشاريع الجديدة قلل من تكلفة "الوقت" الاستثمارية.

**تحسين كفاءة التقنيات:** الاعتماد على أحدث أجيال الألواح الشمسية التي تعطي إنتاجية أعلى حتى في الظروف المناخية المتقلبة.

**التكامل الطاقي:** استطاعت ألمانيا دمج الشمس مع الرياح (التي تلبي 27% من الطلب) لتشكلان معاً منظومة متكاملة تغطي نحو 45% من احتياجات البلاد للكهرباء.

لقد أثبتت التجربة الألمانية أن الاعتماد على الشمس يقلل بشكل مباشر من الارتهان لتقلبات أسعار الوقود الأحفوري العالمية، ويخلق سوقاً محلياً مستداماً للصناعة والابتكار، مما جعل "الكهرباء النظيفة" محركاً حقيقياً للنمو الاقتصادي الألماني.

## نماذج من المشاريـع الاستراتيجية الرائدة

لم تعد ألمانيا تكتفي بالأنظمة الصغيرة، بل انتقلت لمرحلة "المشاريع السيادية" التي تدمج بين الكفاءة التقنية وإعادة تأهيل البيئة:

**مزرعة ويتنيتز للطاقة (Witznitz Solar Farm):** يعد أكبر مشروع طاقة شمسية في أوروبا بقدرة تصل إلى 650 ميجاواط. يقع في ولاية ساكسونيا، وتم بناؤه على أنقاض مناجم فحم سابقة، مما يجعله رمزاً اقتصادياً لتحول "حزام الفحم" إلى "حزام الشمس".



**صورة (١٤) مزرعة ويتنيتز للطاقة**

**مشروع فيربوند فيزيولار (Verbund Visiolar):** مشروع ضخم بقدرة مستهدفة تصل إلى 2 جيجاواط في منطقة براندنبورغ، ويهدف لتزويد الصناعات الثقيلة بطاقة نظيفة ومستقرة، مما يعزز تنافسية المصانع الألمانية.



**صورة (١٥) مشروع فيربوند فيزيولار (Verbund Visiolar)**

## ظاهرة الأنظمة اللامركزية (Balcony Solar)

في عام 2025، سجلت ألمانيا طفرة في الأنظمة الصغيرة (المثبتة على الشرفات)، حيث تجاوز عددها المليون نظام، مما حول المواطن الألماني من "مستهلك" إلى "منتج شريك" في الاقتصاد الوطني.

## الدور التشريعي في تحفيز النهضة الاقتصادية

ساهمت القوانين الألمانية (مثل حزمة الطاقة الشمسية Solar Package I) في تحويل التحديات البيروقراطية إلى فرص استثمارية من خلال:

**1.إعطاء الأولوية للحقن في الشبكة:** يضمن القانون الألماني بيع كل كيلوواط منتج من الشمس قبل أي مصدر أحفوري، مما يقلل المخاطر المالية للمستثمرين.

**2.سياسة "صفر بيروقراطية":** إلغاء متطلبات التسجيل المعقدة للأنظمة الصغيرة والمتوسطة، مما أدى لزيادة معدل التركيب السنوي بنسبة 25% في عام 2025.

## الأثر الاقتصادي المباشر أرقام(2025).

**السيادة الطاقية:** توفير ما يقارب 87 تيراواط/ساعة من الكهرباء شمسياً، مما خفض فاتورة استيراد الغاز الطبيعي بمليارات اليورو.

**سوق العمل:** يعمل في قطاع الطاقة المتجددة الألماني أكثر من 380,000 موظف، مع توقعات بزيادة هذا الرقم نتيجة التوسع في تصنيع العواكس (Inverters) وأنظمة التخزين.

**خفض تكلفة الإنتاج:** وصول حصة الطاقة المتجددة (شمس ورياح) إلى 45% ساعد في استقرار أسعار الكهرباء الصناعية، مما حمى المصانع الألمانية من تقلبات أسواق النفط العالمية.

## الرؤية المستقبلية لألمانيا (أهداف 2030 - 2045)

لا تتوقف الطموحات الألمانية عند الإنجازات الحالية، بل تمتد لرؤية استراتيجية تهدف لجعل البلاد "محايدة مناخياً" بالكامل بحلول منتصف القرن. هذه الرؤية مدعومة بقوانين صارمة وأهداف مرحلية واضحة:

### 1. مستهدفات عام 2030 (الأهداف القريبة)

تخطط الحكومة الألمانية من خلال قانون الطاقة المتجددة (EEG 2023) وتعديلاته الأخيرة للوصول إلى:

215 جيجاواط من الطاقة الشمسية تهدف ألمانيا لمضاعفة قدرتها الحالية لتصل إلى 215 جيجاواط

بحلول 2030. وهذا يتطلب إضافة سنوية ضخمة تصل إلى 22 جيجاواط بدءاً من عام 2026.

**توليد 80% من الكهرباء:** تسعى برلين لأن تغطي المصادر المتجددة (وعلى رأسها الشمس والرياح) نسبة 80% من إجمالي استهلاك الكهرباء الوطني بحلول نهاية العقد الحالي.

**إغلاق محطات الفحم:** التخطيط لإنهاء الاعتماد على الفحم تماماً بحلول 2030، ليكون "اقتصاد الشمس والرياح" هو البديل الوحيد والمستدام.

## 2. رؤية 2040 و 2045 (الحياد الصفري)

400 جيجاواط بحلول 2040: تشير الخطط طويلة المدى إلى استمرار التوسع لتصل القدرة الشمسية المركبة إلى 400 جيجاواط.

**الحياد المناخي 2045:** تهدف ألمانيا لتصبح أول دولة صناعية كبرى تحقق "صافي انبعاثات صفرية" بحلول عام 2045، حيث سيعتمد الاقتصاد الألماني بالكامل على الطاقة الخضراء، بما في ذلك قطاعات النقل والصناعات الثقيلة عبر "الهيدروجين الأخضر" المنتج من الطاقة الشمسية.

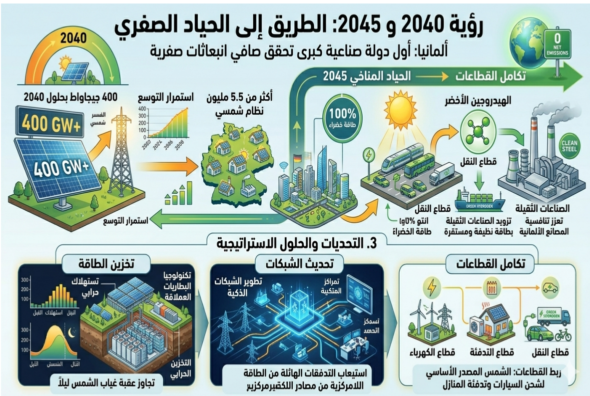
## 3. التحديات والحلول الاستراتيجية

لتحقيق هذه الرؤية، تركز ألمانيا حالياً على ثلاثة محاور:

**1. تخزين الطاقة:** الاستثمار الضخم في تكنولوجيا البطاريات العملاقة لتجاوز عقبة غياب الشمس ليلا.

**2. تحديث الشبكات:** تطوير "الشبكات الذكية" (Smart Grids) القادرة على استيعاب التدفقات الهائلة من الطاقة اللامركزية.

**3. تكامل القطاعات:** ربط قطاع الكهرباء بقطاع التدفئة والنقل (التنقل الكهربائي)، بحيث تصبح الشمس هي المصدر الأساسي لشحن السيارات وتدفئة المنازل.




**صورة (١٦)**

## الهند من الطموح الإقليمي إلى الريادة العالمية في ثورة الطاقة الشمسية

شهدت الهند في السنوات الأخيرة تحولاً استثنائياً في مشهد الطاقة العالمي، حيث ارتقت من لاعب إقليمي إلى رائد دولي يتصدر قائمة الدول الأكثر استثماراً في الاستدامة. إن هذا الصعود لم يكن وليد الصدفة، بل جاء نتاجاً لالتزام سياسي راسخ وأهداف جريئة وضعت البلاد في طليعة القوى المحركة للطاقة المتجددة.

بدأت هذه الرحلة الطموحة بإطلاق "المهمة الوطنية للطاقة الشمسية" عام 2010، والتي استهدفت في بدايتها تحقيق قدرة إجمالية تبلغ 20 جيجاوات بحلول عام 2022. ومن اللافت أن الهند لم تكتفِ بتحقيق هذا الهدف فحسب، بل تجاوزته بمراحل، مبرهنة على نهج استباقي مدعوم بمزيج استراتيجي من المبادرات السياسية، والحوافز المالية، والبيئة التنظيمية القوية.

ومع ذلك، فإن هذا التحول يأتي في سياق معقد؛ حيث تحاول الهند، بجغرافيتها الشاسعة وتعدادها السكاني الضخم، التوفيق بين احتياجاتها التنموية المتسارعة وبين ضرورة مكافحة التلوث البيئي والضباب الدخاني الذي بات يغطي مدنها الكبرى. وبفضل التراجع الحاد في تكلفة الألواح الكهروضوئية، تسارعت وتيرة انتشار

الطاقة الشمسية "بسرعة البرق"، مدفوعة بتعاون وثيق بين القطاعين العام والخاص، لترسم الهند بذلك خارطة طريق عالمية في كيفية تحويل التحديات المناخية إلى فرص اقتصادية مستدامة.

## المحرك الأخضر الأثر الاقتصادي للطاقة الشمسية في الهند

لم تعد الطاقة الشمسية في الهند مجرد خيار بيئي، بل تحولت إلى ركيزة أساسية للنمو الاقتصادي، حيث تساهم بشكل مباشر في تعزيز الناتج المحلي الإجمالي وتوفير حلول مستدامة لتحديات الطاقة والبطالة.

### نمو حجم السوق والاستثمارات الأجنبية

شهد سوق الطاقة الشمسية الهندي قفزة نوعية؛ حيث قدرت قيمة السوق بنحو 30 مليار دولار في عام 2026، ومن المتوقع أن تصل إلى أرقام قياسية تتجاوز 538 مليار دولار بحلول عام 2034، بمعدل نمو سنوي مركب (CAGR) يتجاوز 37%.

**الاستثمار المباشر:** استقطب القطاع استثمارات ضخمة بقيمة تريليونات الروبيات لتعزيز شبكات النقل والبنية التحتية.

**خفض التكاليف:** أدى التوسع في التصنيع المحلي إلى خفض تكلفة إنشاء المشاريع بنسبة 28% في عام 2024، مما جعل الطاقة الشمسية أرخص مصدر للكهرباء في البلاد.

**خلق فرص العمل ومهن المستقبل**

أصبح قطاع الطاقة المتجددة **"مصنعاً للوظائف"** في الهند. تشير الإحصائيات لعام 2024-2025 إلى أن:

عدد العاملين في قطاع الطاقة المتجددة في الهند وصل إلى حوالي 1.3 مليون موظف.

من المتوقع توفير مليون وظيفة مباشرة في قطاع الطاقة الشمسية وحده بحلول عام 2030، ومليوني وظيفة بحلول عام 2040.

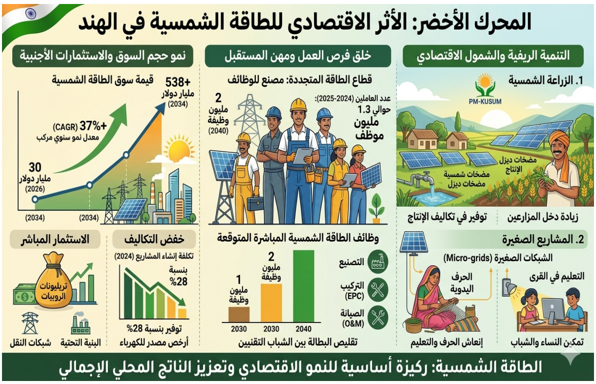
تتنوع هذه الفرص بين التصنيع، التركيب (EPC)، والصيانة (O&M)، مما يساهم في تقليص معدلات البطالة بين الشباب التقنيين.

**التنمية الريفية والشمول الاقتصادي**

لعبت الطاقة الشمسية دوراً حاسماً في النهوض بالمناطق النائية عبر:

**1.الزراعة الشمسية:** من خلال مبادرات مثل (PM-KUSUM)، تم استبدال مضخات الديزل المكلفة بمضخات تعمل بالطاقة الشمسية، مما قلل تكاليف الإنتاج وزاد دخل المزارعين.

**2.المشاريع الصغيرة:** ساهمت الشبكات الصغيرة (Micro-grids) في إنعاش الحرف اليدوية والتعليم في القرى التي كانت تعاني من نقص الكهرباء، مما مكن النساء والشباب من الانخراط في أنشطة اقتصادية مدرة للدخل.




**صورة (١٨)**

## التشريعات والسياسات الداعمة لنشر الطاقة الشمسية في الهند

شكلت التجربة الهندية في صياغة الأطر التشريعية نموذجاً عالمياً يُحتذى به، حيث انتقلت الهند من الاعتماد الكلي على الوقود الأحفوري إلى ريادة قطاع الطاقة المتجددة عبر سلسلة من القوانين والسياسات المتكاملة التي استهدفت تذليل العقبات التقنية والمالية.

### الإطار القانوني والتشريعي الوطني

قانون الكهرباء (Electricity Act, 2003): يُعد الوثيقة الأم التي مهدت الطريق، حيث تضمن نصوصاً صريحة تُلزم الولايات الهندية بتعزيز استخدام الطاقة النظيفة ووضع تعرفة تفضيلية لمشاريع الطاقة الشمسية.

**المهمة الوطنية للطاقة الشمسية (JNNSM):** انطلقت عام 2010 تحت اسم "مهمة جواهر لال نهرو"، وهي السياسة الأكثر تأثيراً، حيث وضعت خارطة طريق لخفض التكاليف وجعل الطاقة الشمسية منافسة للشبكة التقليدية عبر مراحل زمنية محددة.

## سياسة "مجمعات الطاقة الشمسية" (Solar Parks Policy)

لمعالجة أعقد مشكلة واجهت المستثمرين وهي "تخصيص الأراضي"، سنت الحكومة تشريعاً لإنشاء مجمعات ضخمة (Ultra Mega Solar Parks).

**الدور الحكومي:** تلتزم الدولة بتوفير أراضٍ مطهرة قانونياً ومجهزة بالبنية التحتية (طرق، محطات تحويل، وخطوط نقل).

الأثر: ساهم هذا التشريع في جذب كبرى الشركات العالمية لسهولة البدء في التنفيذ المباشر.

**التزامات الشراء المتجددة (RPO) وصافي القياس**

**التزام الشراء (Renewable Purchase Obligation):** قانون يفرض على شركات توزيع الكهرباء والشركات الصناعية الكبرى شراء نسبة مئوية دنيا من احتياجاتها من مصادر شمسية، مما خلق طلباً مستداماً وقوياً في السوق.

**تشريعات صافي القياس (Net Metering):** قوانين منظمة تسمح للمنازل والمصانع الصغيرة بتركيب أنظمة الأسطح وربطها بالشبكة، مع الحصول على ائتمان مالي مقابل الطاقة المصدرة، مما حفز القطاع المنزلي والتجاري.

**السياسات التحفيزية والحماية التجارية**

**1.الإعفاء من رسوم النقل (ISTS Waiver):** أصدرت وزارة الطاقة قراراً بإعفاء مشاريع الطاقة الشمسية من رسوم استخدام الشبكة الوطنية عند نقل الطاقة بين الولايات، مما جعل تكلفة الكهرباء الشمسية المنتجة في الولايات المشمسة (مثل راجستان) رخيصة جداً عند وصولها للمدن البعيدة.

**2.مبادرة "صنع في الهند" (Make in India):** سياسات تجارية تضمنت فرض رسوم جمركية على الخلايا المستوردة لتشجيع التصنيع المحلي، مع تقديم حوافز مرتبطة بالإنتاج (PLI) للمصانع الوطنية.

## المشاريع والابتكارات الهندية في مجال الطاقة الشمسية

شهد العقد الحالي تحولا جذرياً في طبيعة المشاريع الهندية، من المحطات التقليدية إلى مجمعات الطاقة الهجينة والابتكارات القائمة على الذكاء الاصطناعي وتخزين الطاقة، مما جعلها في طليعة دول العالم إنتاجاً وتطويراً.

## المشاريع العملاقة (Mega Projects)

### مجمع "خافدا" للطاقة المتجددة (Khavda Solar Park)

يُعد أضخم مشروع للطاقة المتجددة في العالم (في ولاية غوجارات)، وتبلغ قدرته المخطط لها 30 جيجاواط بحلول عام 2029.

بحلول عام 2026، تم تشغيل مراحل ضخمة منه بقدرة تراكمية تجاوزت 9.4 جيجاواط، وهو يعتمد على تقنيات الألواح ثنائية الوجه (Bifacial) لتعظيم الاستفادة من الانعكاس الأرضي في المناطق الصحراوية.



**صورة (١٩) مجمع "خافدا" للطاقة المتجددة (Khavda Solar Park)**

## محطة "بهادلا" (Bhadla Solar Park)

تقع في ولاية راجستان، وتصنف كواحدة من أكبر محطات الطاقة الشمسية في العالم بمساحة تغطي أكثر من 57 كم². تتميز هذه المحطة باستخدام روبوتات تنظيف جافة تعمل بدون مياه للحفاظ على كفاءة الألواح في بيئة صحراوية قاسية.



**صورة (٢٠) محطة "بهادلا" (Bhadla Solar Park)**

## المشاريع الهجينة (Solar-Wind Hybrid)

بدأت الهند في تنفيذ مشاريع تدمج بين طاقة الرياح والطاقة الشمسية في نفس الموقع لضمان استقرار الشبكة، مثل مشاريع شركة Adani التي أضافت قدرات هجينة تتجاوز الـ 1 جيجاواط لضمان توليد الطاقة على مدار الساعة.

# الابتكارات التقنية والتوجهات الحديثة (2025-2026)

## 1.أنظمة تخزين الطاقة بالبطاريات (BESS):

انتقلت الهند من "توليد الطاقة" فقط إلى "توليد الطاقة القابل للإرسال". تم تدشين مشاريع ضخمة تدمج مئات الميجاواط من الألواح مع أنظمة تخزين بسعة (MWh) عالية، مما يسمح بتزويد الشبكة بالكهرباء حتى بعد غروب الشمس.

## 2.الألواح الشمسية عالية الكفاءة (N-type & Perovskite):

بحلول عام 2026، بدأ التوجه نحو خلايا البيروفسكايت (Perovskite) كاختراق تقني يزيد الكفاءة عن 25%، بالإضافة إلى التوسع في استخدام تقنيات TopCon التي تناسب المناخ الهندي الحار لتقليل الفقد الحراري.

## 3.الابتكار في أنظمة الري (PM-KUSUM):

ابتكار هندي فريد يهدف لربط المزارعين بالطاقة الشمسية، حيث تُستخدم الألواح لتشغيل مضخات المياه، ويُسمح للمزارع ببيع "الفائض" من الكهرباء للشبكة، مما يحول المزارع من مستهلك للطاقة إلى منتج لها.

## 4.الشركات الناشئة والذكاء الاصطناعي (Climate-Tech)

برزت شركات هندية ناشئة متخصصة في التحليل التنبؤي (Predictive Analytics)، حيث تستخدم خوارزميات الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بإنتاجية المحطات بناءً على صور الأقمار الصناعية وحالة الطقس، مما يقلل من هدر الطاقة بنسبة تصل إلى 15%.

## الصين فجر العصر الأخضر وإعادة تشكيل العالم

يشهد قطاع الطاقة العالمي في مطلع هذا القرن تحولاً جذرياً لم يسبق له مثيل منذ الثورة الصناعية الأولى. إن هذا التغيير ليس مجرد انتقال تقني من الوقود الأحفوري إلى المصادر المتجددة، بل هو ثورة شاملة تعيد رسم الخارطة الجيوسياسية والاقتصادية للعالم. وفي قلب هذا التحول، برزت الصين كلاعب محوري، متجاوزةً دورها التقليدي كـ "مصنع للعالم" لتصبح مركز الابتكار والإنتاج المهيمن الذي يقود مستقبل الطاقة النظيفة.

## الصين من التصنيع إلى الريادة الابتكارية

لم تعد الهيمنة الصينية وليدة الصدفة، بل هي نتيجة استراتيجية بعيدة المدى أدت إلى السيطرة على سلسلة الإمداد العالمية بالكامل؛ بدءاً من استخراج المواد الخام كالبولي سيليكون (Polysilicon)، وصولاً إلى تجميع الوحدات الكهروضوئية النهائية. هذا التكامل الرأسي سمح بتحقيق وفورات حجم هائلة، مما أدى إلى خفض تكلفة الألواح الشمسية بنسبة مذهلة تتجاوز 95%، وهو ما جعل الطاقة الشمسية الخيار الأكثر جاذبية للاستثمار في الأسواق النامية والمتقدمة على حد سواء.

## استراتيجية "الثلاثي الجديد"

في خطوة تعكس طموحاً اقتصادياً هائلا ، أطلقت بكين العنان لما يُعرف بـ "الثلاثي الجديد" (The New Three) من الصناعات الاستراتيجية

الألواح الشمسية.

السيارات الكهربائية.

بطاريات الليثيوم.

هذا الثلاثي لم يحل فقط محل الصناعات التقليدية، بل أصبح المحرك الأساسي لصادرات الصين والعمود الفقري للتحول الطاقي العالمي. ففي العام الماضي

وحده، وصلت القدرة الإنتاجية للصين إلى ما يقرب من 1000 جيجاواط، وهو ما يتجاوز ضعف ما يقوم العالم بتركيبه سنوياً، مما يضع المجتمع الدولي أمام حقيقة لا يمكن إنكارها: إن مكافحة التغير المناخي والوصول إلى أهداف الحياد الكربوني تعتمد اليوم بشكل شبه كامل على التكنولوجيا وسلاسل التوريد الصينية.

بينما تتسابق القوى الكبرى في أمريكا وأوروبا لتعزيز إنتاجها المحلي، يظل الفارق في حجم الاستثمار والسرعة الإنتاجية شاسعاً؛ حيث تنفق الصين على الطاقات المتجددة أضعاف ما ينفقه الاتحاد الأوروبي والولايات المتحدة مجتمعين. إن هذا الكتاب يأتي ليحلل هذا المشهد المعقد، مستعرضاً الأرقام والحقائق التي جعلت من الشمس المصدر الأرخص والأكثر وفرة للطاقة في تاريخ البشرية الحديث.

## اقتصاديات الشمس.. كيف تقود الطاقة الشمسية النهضة الصينية الجديدة؟

### حجم القدرة الإنتاجية في أفق 2026

مع حلول عام 2026، من المتوقع أن تُرسخ الصين مكانتها كـ "قوة عظمى طاقية"؛ حيث تشير التقديرات إلى أن القدرة الإنتاجية للألواح الشمسية في الصين

ستتجاوز حاجز 1000 إلى 1200 جيجاواط (1.2 تيراواط) سنوياً.

**فائض الإنتاج:** هذا الحجم لا يغطي احتياجات الصين فحسب، بل يمثل أكثر من 80% من إجمالي القدرة التصنيعية العالمية، مما يجعل العالم يعتمد تقنياً وسعرياً على المصانع الصينية.

**الاستثمار الرأسمالي:** استمرت التدفقات المالية في هذا القطاع لتعزيز "اقتصاد الحجم"، مما أدى إلى خفض التكلفة الرأسمالية (LCOE) لمستويات تجعل الطاقة الشمسية أرخص مصدر للكهرباء في تاريخ البشرية بحلول 2026.

**التحكم العالمي وسيطرة الشركات الصينية**

لا تكتفي الشركات الصينية (مثل Jinko Solar, Longi, Trina) ببيع الألواح، بل تسيطر على سلسلة القيمة المضافة بالكامل:

**المواد الخام:** إنتاج مادة البولي سيليكون عالي النقاء.

**التكنولوجيا المتقدمة:** الريادة في تقنيات الخلايا الجديدة (مثل TOPCon و HJT) التي ترفع الكفاءة وتخفض الفواقد.

**الهيمنة السوقية:** التحكم في الأسعار العالمية من خلال "الإغراق المنظم" أو المنافسة السعرية الشرسة، مما وضع الشركات الأوروبية والأمريكية في موقف الدفاع والمطالبة بفرض ضرائب جمركية لحماية صناعاتها المحلية.

**خلق فرص العمل والأثر الاجتماعي**

قطاع الطاقة الشمسية ليس مجرد أرقام طاقة، بل هو محرك تشغيل هائل:

**داخلياً في الصين:** يوفر القطاع ملايين الوظائف المباشرة في التصنيع، والبحث والتطوير، والتركيب. بحلول 2026، يُتوقع أن يتجاوز عدد العاملين في قطاع الطاقة المتجددة في الصين حاجز الـ 10 ملايين موظف.

**تغطية الاحتياج المحلي:** تتبع الصين استراتيجية "الإنتاج الضخم للاستهلاك الضخم"؛ حيث تهدف للوصول إلى ذروة الانبعاثات قبل 2030 عبر تركيب مزارع شمسية عملاقة في مناطق مثل "صحراء غوبي"، مما يقلل اعتمادها على استيراد الفحم والغاز ويحقق أمنها الطاقي.

## التأثير على اقتصاديات الدول (الفرص والتحديات)

**الدول النامية والمستوردة:** استفادت دول مثل الأردن ودول أفريقيا من "الرخص الصيني" لتقليل فاتورة الطاقة الوطنية وتسريع وتيرة التحول الطاقي.

**الدول الصناعية المنافسة:** تعاني الدول الغربية من "فجوة التنافسية"، مما دفعها لتبني سياسات مثل (Inflation Reduction Act) في أمريكا لمحاولة موازنة الكفة، ولكن تظل السرعة الصينية في سلاسل الإمداد هي العائق الأكبر أمامهم.




**صورة (٢١)**

## المحركات التشريعية والسياسات الاستراتيجية للصين

لم تكتفِ الحكومة الصينية بتقديم الدعم المالي، بل وضعت إطاراً تشريعياً متكاملاً تطور عبر مراحل زمنية مدروسة، مما حول الطاقة الشمسية من قطاع ناشئ إلى ركيزة اقتصادية وطنية.

### 1. الخطط الخمسية الوطنية (The Engine of Growth)

تعتبر الخطط الخمسية في الصين هي الموجه الرئيسي للاقتصاد.

**الخطة الخمسية الثالثة عشرة (2016-2020):** ركزت على التوسع الضخم في القدرة المركبة وخفض التكاليف.

**الخطة الخمسية الرابعة عشرة (2021-2025):** استهدفت رفع حصة الطاقة غير الأحفورية في استهلاك الطاقة الأولية إلى 20%.

**أفق 2026 (بداية الخطة الخامسة عشرة):** تركز التشريعات الحالية على تعزيز "أمن الطاقة" ودمج الذكاء الاصطناعي في إدارة الشبكات الذكية لاستيعاب التدفق الهائل من الطاقة الكهروضوئية.

## 2. نظام تعريفة التغذية الكهربائية (Feed-in Tariffs - FiT)

كان هذا التشريع هو "الوقود" الحقيقي للنمو في بداياته:

**ضمان الشراء:** ألزمت الحكومة شركات الشبكات بشراء كل الطاقة المنتجة من المشاريع الشمسية بأسعار محددة ومجزية لفترات طويلة (تصل لـ 20 عاماً).

**جذب الاستثمار:** وفر هذا النظام بيئة آمنة للمستثمرين والبنوك لتمويل المشاريع الكبرى، مما أدى إلى انفجار في عدد المزارع الشمسية.

## 3. برنامج "العداء المتصدر" (Top Runner Program)

أطلقت الصين هذا البرنامج في عام 2015 لتحويل التركيز من "الكم" إلى "الكيف":

**رفع المعايير التقنية:** اشترط البرنامج منح عقود المشاريع الحكومية فقط للشركات التي تستخدم ألواحاً ذات كفاءة مرتفعة (مثل تقنيات PERC و TOPCon لاحقاً).

**تحفيز الابتكار:** أجبر هذا التشريع الشركات على الاستثمار الضخم في البحث والتطوير (R&D) للبقاء

في المنافسة، مما جعل التكنولوجيا الصينية هي الأحدث عالمياً.

### 4. الوصول إلى "تعادل الشبكة" (Grid Parity)

مع نضوج السوق، انتقلت التشريعات من الدفع المباشر (Subsidies) إلى نظام المناقصات التنافسية:

**إلغاء الدعم تدريجياً:** أصبحت المشاريع الجديدة تُنفذ بأسعار تنافسية مساوية أو أقل من تكلفة الكهرباء المولدة من الفحم.

**تحرير السوق:** تشريعات عام 2026 تركز الآن على تجارة الكربون (Carbon Trading) ومنح حوافز للمصانع التي تعتمد بنسبة 100% على الطاقة الخضراء.

### 5. الالتزام بأهداف "60/30"

أعلن الرئيس الصيني عن التزام تاريخي يمثل المظلة القانونية لكل التشريعات الحالية:

**عام 2030:** الوصول إلى ذروة الانبعاثات الكربونية.

**عام 2060:** تحقيق الحياد الكربوني الكامل.

هذا الالتزام السياسي تحول إلى قوانين ملزمة للمقاطعات والشركات الكبرى، مما يضمن استدامة الطلب المحلي على الطاقة الشمسية لعقود قادمة.

**ملخص المشهد:** السيادة التقنية والاقتصادية

في ختام هذا الجزء، يتضح لنا أن الريادة الصينية في قطاع الطاقة الشمسية لم تكن مجرد طفرة صناعية عابرة، بل هي نتاج استراتيجية وطنية دقيقة زاوجت بين التشريعات المرنة، الابتكار التقني، والقدرة الفائقة على التصنيع الكمي. لقد نجحت بكين في تحويل "الطاقة الشمسية" من بديل مكلف يحتاج للدعم الحكومي إلى محرك اقتصادي عالمي يفرض شروطه على أسواق الطاقة الدولية.

## التنين الصيني.. المختبر العالمي وريادة الابتكار (2025-2026)

لا تكتفي الصين بكونها أكبر مُنتج للطاقة الشمسية في العالم، بل تحولت إلى "مركز الأبحاث العالمي" الذي يحدد المعايير التقنية للعقد القادم.

**1. الابتكارات التقنية:** تجاوز الحدود الفيزيائية للسيليكون

في عام 2026، انتقل التركيز من زيادة حجم الألواح إلى زيادة "كفاءة الخلية" عبر تقنيات ثورية

## خلايا البيروفسكايت والسيليكون الترادفي (Tandem Cells):

**الإنجاز:** حققت شركة LONGi رقماً قياسياً (مارس 2026) بكفاءة 33.4% للألواح المرنة و35% مخبرياً.

**الأهمية الهندسية:** تجاوز "حد شوكلي-كويسر" (Shockley-Queisser limit) للسيليكون التقليدي، مما يعني إنتاج طاقة أكبر من مساحة سطح أصغر.

## تقنية الاتصال الخلفي الكامل (ABC - All Back Contact)

**الابتكار:** قامت شركة AIKO بنقل الأقطاب الكهربائية للجهة الخلفية تماماً.

**الميزة التقنية:** القضاء التام على خسائر الظل (Shading losses) الناتجة عن القضبان الناقلة (Busbars) في الواجهة الأمامية، مما رفع الكفاءة والجمالية المعمارية.

**الألواح المرنة فائقة النحافة**

**المواصفات:** ألواح بسمك 60 ميكرومتر (أرق من الورق).

**التطبيق:** فتحت آفاقاً جديدة لدمج الطاقة الشمسية في الأسطح المنحنية للسيارات الكهربائية والمباني ذات التصاميم الهندسية المعقدة (BIPV).

**2. المشاريع العملاقة:** هندسة المساحات الشاسعة

تتعامل الصين مع مشاريع الطاقة الشمسية بمقياس "جغرافي" وليس مجرد "محطات"

**مجمع "طالاتان" (Talatan) - هضبة التبت**

المساحة: وصلت إلى 610 كم² بحلول عام 2026.

العبقرية الهندسية: مشروع هجين يربط (الشمس + الرياح + الطاقة المائية) مع خطوط نقل الضغط العالي جداً (UHV) لنقل الطاقة لمسافات تتجاوز 1600 كم دون فواقد كبيرة.



**صورة (٢٢) مجمع "طالاتان" (Talatan) ـهضبة التبت**

## مشروع "دونغ ينغ" البحري (Offshore Solar)

القدرة: 1 جيجاواط (تشغيل كامل في ديسمبر 2025).

**الجدوى الفنية:** استغلال التبريد الطبيعي للمياه لرفع كفاءة الألواح بنسبة تصل إلى 15%، مع استخدام أكثر من 2.3 مليون لوح ثنائي الوجه(Bifacial)



**صورة (٢٢) مشروع "دونغ ينغ" البحري (Offshore Solar)**

### 3. التحول الاستراتيجي والتكامل الطاقي

تفوقت الصين في دمج الطاقة الشمسية مع قطاعات أخرى لضمان استقرار الشبكة

**التخزين الحراري بالأملاح المنصهرة (CSP):** ربط محطات الطاقة الشمسية المركزة بمشاريع الهيدروجين الأخضر الضخمة، مما يوفر طاقة حرارية وكهربائية مستمرة حتى بعد غياب الشمس.

**وتيرة التركيب:** ركبت الصين 315 جيجاواط في عام 2025 وحده، وهو ما رفع حصة الشمس في مزيج الكهرباء الوطني إلى 11%.

## الرؤية المستقبلية في أفق 2026 - 2030

بناءً على المعطيات الحالية، يمكن استشراف ملامح العقد القادم من خلال المحاور التالية:

### 1. من "الكم" إلى "الذكاء" (AI & Smart Grids):

لن يقتصر الطموح الصيني في عام 2026 وما بعده على زيادة عدد الألواح، بل سينصب التركيز على دمج الذكاء الاصطناعي في إدارة المحطات الضخمة وأنظمة التخزين، مما يضمن استقرار الشبكات وتجاوز مشكلة "التقطع" في إنتاج الطاقة الشمسية.

## 2. ثورة المواد الجديدة (Perovskite & Beyond):

تستعد المختبرات الصينية لقيادة المرحلة القادمة من كفاءة الخلايا عبر تقنية البيروفسكايت (Perovskite) والخلايا الترادفية (Tandem Cells)، والتي من المتوقع أن تكسر حاجز الـ 30% كفاءة تجارياً، مما يعني إنتاج طاقة أكبر من مساحات أقل وتكلفة أدنى.

## 3. الهيدروجين الأخضر الوقود القادم

تخطط الصين لربط مزارعها الشمسية العملاقة بمشاريع إنتاج الهيدروجين الأخضر، لتحويل الطاقة الشمسية إلى وقود سائل يمكن تصديره واستخدامه في الصناعات الثقيلة والطيران، مما يعزز سيطرتها على سلاسل توريد الطاقة النظيفة عالمياً.

## 4. طريق الحرير الأخضر (Green Belt and Road)

ستستمر الصين في تصدير نموذجها الطاقي عبر استثمارات ضخمة في البنية التحتية للطاقة في الدول النامية (ومن ضمنها منطقة الشرق الأوسط والأردن)،

مما يعيد تشكيل التحالفات الجيوسياسية بناءً على "أمن الطاقة المتجددة" بدلا من النفط.

إن الهيمنة الصينية قد وضعت العالم أمام خيار واحد: التسارع في تبني الطاقة الشمسية. ورغم التحديات والمنافسة الدولية، تظل الحقيقة القائمة هي أن "الشمس الصينية" قد أشرقت بالفعل على اقتصاديات العالم، ممهدة الطريق لعصر جديد تكون فيه الطاقة نظيفة، رخيصة، ومتاحة للجميع.

# عثرات في طريق الضوء التحديات الكفاءة ومعادلة التغيير

بعد أن أبحنا في فصولنا السابقة في أعماق التاريخ، ورأينا كيف طوعت الشعوب القديمة حرارة الشمس، وصولاً إلى عصرنا الحديث حيث استعرضنا تجارب الدول الرائدة التي جعلت من "الفوتون" ركيزةً أساسية لاقتصادها واستثماراتها؛ بات من المسلم به أن الطاقة الشمسية لم تعد خياراً ثانوياً، بل ضرورة لا غنى عنها ومحركاً لسياسات وتشريعات دولية تهدف لضمان مستقبل أخضر.

ولكن، رغم هذا الاندفاع العالمي وهذا الصعود المذهل، يبقى هناك سؤال يفرض نفسه: لماذا لم نحتل السماء بعد؟

إننا نعيش في زمن الاكتشافات المعاصرة، ومع ذلك، ما زالت الإنتاجية الفعلية للأنظمة الشمسية تواجه فجوة كبيرة بين الواقع والطموح. فإذا نظرنا إلى كفاءة الألواح التجارية الحالية، سنجد أنها تتراوح بين 22% إلى 25% كأقصى حد للاستفادة تقرياً وهي نسبة تبدو متواضعة إذا ما قورنت بحجم الإشعاع الساقط علينا يومياً. وهنا يبرز التساؤل المثير: تخيل ماذا لو استطعنا رفع إنتاجية هذه الأنظمة لتلامس حاجز الـ 100%؟ كيف سيتحول وجه الأرض والطاقة؟

في هذا الفصل، سنواجه الحقائق الميدانية والتحديات التي تقف عائقاً أمام هذا الحلم. سنناقش بعمق

**1. المعضلات التقنية:** بدءاً من انخفاض كفاءة الخلايا، وصولا إلى تعقيدات تخزين الطاقة وضياعات التحويل.

**2.العقبات السياسية والاقتصادية:** من تشريعات بعض الدول التي قد تبدو "خانقة" للانتشار، إلى التكلفة الرأسمالية العالية التي تتطلبها البداية.

**3.الحلول المبتكرة:** لن نكتفي بطرح المشكلات، بل سنبحر في نقاش أفكار معاصرة وحلول نظرية وعملية مقترحة، تهدف إلى كسر هذه القيود وفتح آفاق جديدة لاستغلال طاقة الشمس بأقصى كفاءة ممكنة.

## المعضلات التقنية كفاءة الخلايا الشمسية الأسباب والحلول

تعتبر الكفاءة (Efficiency) هي التحدي الأكبر في صناعة الألواح الشمسية، حيث تضيع كمية كبيرة من الطاقة الشمسية المتاحة قبل تحويلها إلى تيار كهربائي. تندرج هذه المعوقات تحت عدة تصنيفات رئيسية:

### 1. العوامل البيئية والتشغيلية

تؤثر الظروف المحيطة بشكل مباشر على انسيابية تدفق الإلكترونات داخل الخلية

**التظليل الجزئي:** يعمل النظام الشمسي كالسلسلة؛ إذا تعطلت حلقة (خلية) بسبب ظل شجرة أو مبنى، يتأثر أداء المصفوفة بأكملها، مما يسبب فاقدًا كبيرًا في الجهد.

**التلوث والأوساخ:** تراكم الغبار وفضلات الطيور يخلق حاجزًا فيزيائيًا يمنع وصول الفوتونات إلى مادة السيليكون، وهو ما يتطلب صيانة دورية خاصة في المناطق الصحراوية.

**الإجهاد الحراري:** على عكس الشائع، الحرارة العالية **"عدو"** للألواح الشمسية. ارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى انخفاض فرق الجهد، مما قد يقلل الكفاءة بنسبة تتراوح بين 10% و 25% في الأجواء شديدة الحرارة.

## 2. القيود المادية والتدهور الفيزيائي (LID)

أثبتت الدراسات الحديثة، ومنها دراسة جامعة مانشستر (2019)، أن هناك أسبابًا بنيوية داخل مادة السيليكون نفسها تؤدي إلى تراجع الكفاءة:

**عيب "البورون والأكسجين":** اكتشف العلماء وجود خلل مادي في السيليكون المستخدم، حيث يحدث تحول في الشحنة الإلكترونية داخل الخلية يعمل كـ **"فخ"** يعيق تدفق الشحنات.

**التدهور الناجم عن الضوء (Light-Induced Degradation):** تنخفض كفاءة الألواح من 20% إلى حوالي 18% خلال الساعات الأولى من التشغيل بسبب هذا العيب الكامن الذي لا ينشط إلا بعد تعرض الألواح لأشعة الشمس وتسخينها.

التدهور الطبيعي السنوي: تتعرض المواد المكونة للخلايا لتآكل طبيعي يؤدي لانخفاض الإنتاجية بنسبة 10% إلى 20% على مدار 20 عامًا.

**3. التصميم والأخطاء الكهربائية**

تلعب الهندسة دورًا حاسمًا في تقليل المفاقيد التقنية

**زوايا التوجيه:** التركيب بزاوية غير مثالية بالنسبة لمسار الشمس يقلل من امتصاص الإشعاع المباشر.

**مفاقيد النقل:** ضعف التوصيلات الكهربائية أو استخدام أسلاك ذات مقاومة عالية يؤدي إلى ضياع الطاقة على شكل حرارة قبل وصولها إلى المحولات (Inverters).

إن تجاوز عقبة الـ 20% في كفاءة الألواح التجارية يتطلب دمجًا بين الحلول الهندسية (مثل تقنية DLTS للتحليل الطيفي) والابتكارات المادية في أشباه

الموصلات. الاستثمار في مكونات عالية الجودة مع تصميم دقيق هو السبيل الوحيد لتقليل أثر هذه المعضلات التقنية.

## تعقيدات التخزين وضياعات التحويل في الأنظمة الكهروضوئية

ما وراء كفاءة الألواح

لا تتوقف تحديات الطاقة الشمسية عند حدود كفاءة الألواح وتأثرها بالعوامل الجوية المعروفة كارتفاع درجات الحرارة وتراكم الغبار؛ بل تبدأ "الرحلة الشاقة" للطاقة بعد خروجها من اللوح مباشرة. فبالرغم من التطور الهائل في وسائل التخزين الحديثة، إلا أننا نصطدم بواقع فيزيائي يفرض علينا فواقد إجبارية أثناء عمليات التحويل والتخزين الكيميائي. إن فهم هذه التعقيدات هو ما يفرق بين نظام مصمم "على الورق" ونظام هندسي واقعي يلبي احتياجات الحمل الفعلي دون انقطاع، حيث يبرز مفهوم "صافي الطاقة" كفيصل أساسي يوضح الكمية الحقيقية التي استقرت في أجهزتنا بعد رحلة مليئة بالضياعات.

### 1. لغز التحويلات الضائعة: ضريبة الانتقال

بمجرد تولد التيار المستمر (DC) من الألواح، يبدأ استنزاف الطاقة عبر عدة محطات تحويلية:

**كفاءة الأجهزة الإلكترونية (Inverters & MPPT):** تعمل أجهزة العواكس ومنظمات الشحن بكفاءة تتراوح غالباً بين 90% إلى 97%. هذا يعني أن هناك ضياعاً ثابتاً يصل إلى 10% يتحول مباشرة إلى حرارة داخل الأجهزة نتيجة عمليات التقطيع الإلكتروني (Switching). التعقيد هنا أن هذه الكفاءة ليست ثابتة، بل تنخفض بشكل حاد إذا كان العاكس يعمل بـ "حمل جزئي" (مثلاً تشغيل أحمال بسيطة على عاكس كبير).

**ضياع المقاومة في التوصيلات (Ohmic Losses):** الأسلاك والموصلات تستهلك جزءاً من الطاقة فيما يُعرف بهبوط الجهد (Voltage Drop). هذه الضياعات تتراوح عادة بين 1% إلى 3%، لكنها قد تزداد بشكل كارثي إذا لم يتم اختيار أقطار الأسلاك بدقة أو إذا كانت المسافات طويلة بين الألواح ومنظومة التخزين.

**فواقد عدم التوافق (Mismatch):** تظهر هذه المشكلة عند وجود تفاوت في الأداء بين الألواح، مما يؤدي إلى ضياع جزء من القدرة الكلية للمصفوفة، وهي خسارة تقنية تُضاف إلى خسائر الظلال والغبار.

## 2. تعقيدات التخزين التحدي الكيميائي

يعتبر التخزين هو المرحلة الأكثر تعقيداً، حيث تتحول الطاقة الكهربائية إلى كيميائية ثم تعود لتهرب مرة أخرى:

كفاءة الدورة الكاملة (Round-Trip Efficiency): البطارية "تأخذ أكثر مما تعطي"؛ ففي بطاريات الرصاص الحمضية، قد نخسر ما يصل إلى 20% من الطاقة المشحونة خلال التفاعلات الكيميائية والحرارية داخلها. وحتى في تقنيات الليثيوم المتطورة، هناك ضياع تقني يتراوح بين 2% إلى 5%.

**عامل الحرارة وعمر البطارية:** الحرارة ليست عدواً للألواح فقط، بل هي "قاتل صامت" للبطاريات. فارتفاع درجة حرارة الوسط المحيط يزيد من المقاومة الداخلية للبطارية ويقلل من كفاءة الشحن، مما يجعل جزءاً كبيراً من تيار الشحن يضيع كحرارة بدلاً من تخزينه كطاقة كيميائية.

**حدود التفريغ الآمن (DoD):** من التعقيدات التشغيلية أننا لا نستطيع استخدام كامل سعة التخزين؛ فالبقاء ضمن حدود التفريغ الآمن (مثلاً 50% للأسيد أو 80% لليثيوم) يعني أن "صافي الطاقة" المتاح للاستخدام الفعلي هو دائماً أقل بكثير من السعة الاسمية المكتوبة على البطارية.

**النتيجة النهائية:** مفهوم صافي الطاقة المتاحة

عند جمع كافة الضياعات السابقة (بدءاً من كفاءة الألواح المتأثرة بالحرارة، وصولا إلى فواقد الأسلاك، ثم كفاءة العواكس، وانتهاءً بضياعات التخزين الكيميائي)، نجد أن المنظومة تفقد ما يتراوح بين 25% إلى 40% من قدرتها النظرية قبل أن تصل إلى المقبس الكهربائي.

لذلك، فإن "صافي الطاقة" ليس مجرد رقم، بل هو الحصيلة النهائية التي تضمن استمرارية النظام. فالمصمم الناجح هو من يحسب "ميزانية الضياعات" بدقة، ليتأكد أن الطاقة المتبقية بعد كل هذه التعقيدات كافية لتغطية الأحمال، خاصة في الظروف القاسية أو فترات غياب الإشعاع الشمسي.

## آفاق التحول العالمي العقبات والسياسات الاقتصادية في قطاع الطاقة الشمسية

تعد الطاقة الشمسية اليوم حجر الزاوية في التحول نحو الاقتصاد الأخضر، حيث لم تعد مجرد خيار بيئي بل أصبحت استثماراً استراتيجياً للأفراد والمؤسسات. ومع ذلك، فإن هذا التحول العالمي يواجه شبكة معقدة من

التحديات التي تتطلب موازنة دقيقة بين الابتكار التقني والسياسات الاقتصادية والتعاون الدولي.

### 1. العقبات الهيكلية والتقنية

تواجه عملية التوسع في الاعتماد على الطاقة الشمسية مجموعة من العوائق الميدانية التي تؤثر على جاذبيتها الاقتصادية

**حاجز التكلفة الأولية:** رغم الانخفاض الحاد في أسعار الألواح، تظل تكاليف التركيب، والتجهيز، والربط بالشبكات مرتفعة، مما يجعل المستهلك بحاجة مستمرة إلى حوافز مالية أو دعم حكومي للبدء.

**معضلة التخزين والاستمرارية:** ترتبط كفاءة النظام بتوافر أشعة الشمس، مما يطرح تحدي "التوليد المتقطع". يتطلب حل هذه المشكلة تقنيات تخزين (بطاريات) متطورة لا تزال تكلفتها تمثل عبئاً إضافياً على الجدوى الاقتصادية للمشاريع.

**جاهزية البنية التحتية:** تحتاج الشبكات الكهربائية التقليدية إلى تحديثات جذرية لتتمكن من استيعاب وتوزيع تدفقات الطاقة المتغيرة القادمة من المصادر المتجددة دون التأثير على استقرار النظام الكهربائي.

## 2. المشهد السياسي والتنافسية الاقتصادية

لا يتحرك قطاع الطاقة في فراغ، بل يتأثر بالصراعات التجارية والسياسات السيادية للدول:

الصراع مع الطاقة التقليدية: لا تزال الوقود الأحفوري يتمتع بدعم حكومي واستثمارات ضخمة متجذرة، مما يخلق بيئة تنافسية غير عادلة تتطلب تشريعات قوية لتعزيز حصة الطاقة المتجددة.

**التوازنات التجارية الدولية:** تواجه الحكومات تحدياً في حماية صناعاتها المحلية عبر التعريفات الجمركية والقيود التجارية، وبين الرغبة في خفض التكاليف عبر استيراد التقنيات الرخيصة. النجاح طويل الأمد يعتمد على الاتفاقيات الدولية التي تضمن وصولا عادلا للتقنية.

## 3.الطاقة الشمسية كأداة للمرونة والأمن الطاقي

بعيداً عن الجانب المادي، تبرز الطاقة الشمسية كعنصر أمان في مواجهة الكوارث والأزمات

**أنظمة الطاقة الهجينة:** دمج الشمس مع مصادر أخرى (كالرياح أو الديزل) يخلق نظاماً مرناً قادراً على التكيف مع الظروف الجوية والبيئية المختلفة.

**الاستجابة السريعة للأزمات:** تبرز أهمية الطاقة الشمسية في المناطق المنكوبة، حيث توفر حلولاً فورية ومستقلة لتشغيل العمليات الحيوية والمعدات الطبية بعيداً عن الشبكات المركزية المتضررة.

**الاستقلال الطاقي:** يساهم تنويع المصادر في تقليل الاعتماد على الوقود المستورد، مما يمنح الدول سيادة أكبر ومرونة في مواجهة تقلبات الأسعار العالمية.

### 4. المسار نحو التعافي والتنمية المستدامة

إن دمج الطاقة الشمسية في خطط إعادة الإعمار ليس مجرد حل مؤقت، بل هو استثمار في المستقبل

**إعادة البناء الأخضر:** توظيف الأنظمة الشمسية في المجتمعات التي يعاد بناؤها يقلل من مخاطر التعرض للأزمات الطاقية مستقبلاً.

**تعزيز الوعي المجتمعي:** تلعب المجتمعات المحلية دوراً محورياً عبر تشكيل فرق طوارئ تعتمد على الأنظمة المستقلة، مما يقلل الاعتماد الكلي على الدولة في أوقات الطوارئ.

## دعوة للعمل

إن التذبذب الحالي في أسواق الطاقة الشمسية ليس علامة فشل، بل هو "جرس إنذار" لإعادة صياغة

السياسات. لن يتحقق الاقتصاد الأخضر إلا بتضافر جهود الحكومات والقطاع الخاص، من خلال ابتكار حلول تمويلية ذكية، وتحديث البنية التحتية، وضمان شروط تجارية عادلة عالمياً. إن التحديات جسيمة، لكن استدامة الكوكب تعتمد على مدى قدرتنا على تجاوزها.

## المنظومة المتكاملة للابتكار الحلول في الطاقة الشمسية

إن الانتقال العالمي نحو الطاقة المستدامة لم يعد يعتمد على تطوير الألواح فحسب، بل بات يعتمد على **"**نظام بيئي**"** متكامل يدمج بين كفاءة المواد، ذكاء الشبكات، والتشريعات الاقتصادية المرنة.

### 1. ثورة الأداء: من الخلية إلى المنظومة (Technical Transformation)

تجاوزت الابتكارات الحديثة حدود السيليكون التقليدي لتركز على تقنيات ترفع الكفاءة وتطيل عمر النظام

**رفع كفاءة التحويل:** من خلال خلايا البيروفسكايت الترادفية (Tandem Cells) التي تكسر حاجز الـ 30% كفاءة، وتقنيات الوصلات المتباينة (HJT) التي تضمن أداءً عالياً في المناخات الحارة.

**التصميم الذكي:** برزت الألواح ثنائية الوجه (Bifacial) التي تستغل الإشعاع المنعكس، والأنظمة العائمة (Floating PV) التي تعالج ندرة الأراضي وتبرد الألواح ذاتياً.

**المواد النانوية:** استخدام النقاط الكمومية لتحسين الامتصاص الطيفي والطلاءات النانوية ذاتية التنظيف (Self-Cleaning) لتقليل فواقد الغبار (Soiling) في المناطق الصحراوية.

## 2. استقرار الشبكة وتخزين الطاقة (Grid & Storage Solutions)

لم يعد التقطع (Intermittency) عائقاً بفضل حلول الربط الذكي

**تعدد وسائط التخزين:** التوجه نحو بطاريات التدفق (Flow Batteries) للتخزين طويل الأمد، وتحويل الفائض إلى هيدروجين أخضر كخزان طاقة استراتيجي.

**الشبكات المتقدمة:** الاعتماد على المحولات الذكية (Smart Inverters) والذكاء الاصطناعي لإدارة الشبكات المصغرة (Microgrids)، مما يمنح الشبكة "قصوراً ذاتياً اصطناعياً" يحميها من التذبذب.

**تكامل الأحمال:** تبرز تقنيات V2G (من السيارة إلى الشبكة) لتحويل الأسطول الكهربائي إلى بطارية عملاقة تدعم استقرار التيار.

### 3. الاقتصاد الدائري والابتكار في الموارد

الابتكار الحقيقي يكمن في استدامة السلسلة كاملة، عبر تطوير تقنيات إعادة تدوير الألواح لاستعادة المواد الثمينة كالسيليكون والفضة، مما يحول النفايات الشمسية إلى مدخلات صناعية جديدة، ويقلل التكلفة الاقتصادية الإجمالية للمشاريع (LCOE).

### 4. المحركات التشريعية والأسس الاقتصادية (Policy & Economics)

التكنولوجيا لا تنجح دون إطار قانوني يحفز الاستثمار:

**النماذج المالية المبتكرة:** تحول السوق من تملك الأصول إلى نماذج الخدمة (Solar-as-a-Service) واتفاقيات شراء الطاقة (PPA) التي تضمن تدفقاً نقدياً مستقراً للمستثمرين.

**التشريعات المرنة:** تفعيل صافي القياس الافتراضي وتجارة الطاقة (P2P) عبر البلوكشين، مما يتيح تداول الطاقة بين المستهلكين مباشرة.

**السياسات التحفيزية:** دمج "شهادات الكربون" و"السندات الخضراء" لتوفير تمويل بفوائد منخفضة، بالتوازي مع كودات بناء تفرض دمج الطاقة الشمسية (BIPV) في المدن الحديثة.

في نهاية هذا الفصل، نكون قد استعرضنا بعمق تلك العلاقة الجدلية بين التحديات والحلول في عالم الطاقة الشمسية؛ فمن الأزمات التي تعترض مسار انتشارها، إلى تعقيدات السياسات والتشريعات التي تحكم أسواقها، وصولاً إلى العقبات العلمية والتقنية المتمثلة في كفاءة التحويل ومعضلات التخزين.

إلا أننا، ومن خلال استعراضنا للحلول المبتكرة والتقنيات الواعدة، أدركنا أن كل عائق تقني كان بمثابة شرارة لابتكار جديد؛ سواء في تطوير مواد نانوية ترفع كفاءة الخلايا، أو في إيجاد أنظمة تخزين وربط ذكي تضمن استقرار الإمداد.

إن الخلاصة التي نخرج بها هي: لكي تضمن الطاقة الشمسية استمرارية انتشارها وتثبت ريادتها كقائد فعّال لمزيج الطاقة العالمي، لا بد من تبني نهج شمولي يراعي كافة النقاط التي فصّلناها؛ بدءاً من مختبرات البحث العلمي، مروراً بساحات صياغة القوانين، وصولا إلى الأسس الاقتصادية المتينة.

إن مراعاة هذه التكاملية هي السبيل الوحيد للعبور نحو نظام طاقة مستدام، لا ينضب ولا ينفد، نظامٍ يضع مصلحة البشرية واستدامة كوكبنا في قلبه، ليبقى نور الشمس ليس مجرد ضياء، بل طاقةً تُحيي المستقبل وتفيد الأجيال القادمة.

# الريادة الأردنية في الطاقة الشمسية

## عبور الأردن نحو العصر الشمسي

لم تكن الطاقة الشمسية في الأردن مجرد خيار تقني عابر، بل بدأت كفكرة جريئة ولدت من رحم الحاجة والإيمان بالاستدامة. ولعل قصة السيد "عبد الجبار العدوان" في قرية الكفير بمحافظة جرش، تجسد هذه البداية بكل تفاصيلها؛ فبعد أربعين عاماً من الاغتراب، عاد ليجد في شمس الأردن وطناً وطاقة. كانت تجربته في عام 2010 هي حجر الزاوية للمبادرات الفردية، حيث استطاع بوعيه البيئي تطويع الألواح الشمسية وطاقة الرياح لتلبية احتياجات منزله، متجاوزاً عقبات الربط التقليدي بالشبكة، ليثبت مبكراً أن "الخيرات التي أنعم الله بها على عباده" قادرة على صنع الفارق.

من التجربة الفردية إلى الانطلاقة المؤسسية

بينما كانت تلك المحاولات الفردية ترسم ملامح الأمل، بدأت الدولة الأردنية تخطو خطواتها الرسمية نحو هيكلة القطاع؛ فكانت الفترة ما بين 2014-2015 هي نقطة التحول الحقيقية أو "النقلة النوعية" في تاريخ الطاقة المتجددة بالمملكة. في هذه المرحلة، انتقل الأردن من مرحلة الاستخدام المحدود والسخانات الشمسية التقليدية إلى مرحلة المشاريع الكبرى

(Utility-scale projects)، مدعوماً بتشريعات وقوانين فتحت الباب أمام الاستثمارات الضخمة.

**الأثر الاقتصادي والسوق المحلي**

لقد أحدث هذا التحول زلزالا إيجابياً في هيكلية الاقتصاد والسوق الأردني، ويمكن تلخيص هذا الأثر في نقاط رئيسية:

**1.توطين التكنولوجيا:** لم يعد الأردن مجرد مستورد، بل ظهرت صناعات محلية رائدة (مثل شركة فيلادلفيا للطاقة الشمسية) التي ساهمت في تصنيع الألواح وتصديرها، مما وفر فرص عمل تقنية متخصصة للشباب الأردني.

**2.تخفيف الفاتورة النفطية:** ساهم التوسع الهائل، الذي وصل إلى سعة تجاوزت 2000 ميغاواط بحلول عام 2025، في تقليل اعتماد الدولة على استيراد الوقود الأحفوري، مما عزز من أمن الطاقة الوطني.

**3.تمكين المستهلك:** تحول المواطن من مستهلك سلبي للطاقة إلى "منتج" لها، حيث مكنت برامج دعم الألواح الشمسية المنزليين والمصانع من خفض تكاليفهم

التشغيلية، مما انعكس إيجاباً على القدرة الشرائية والتنافسية للقطاعات الإنتاجية.

اليوم، يقف الأردن كنموذج إقليمي يُحتذى به، بطموح لا يتوقف عند سد الاحتياج المحلي، بل يمتد لرفع مساهمة الطاقة المتجددة إلى 50% بحلول عام 2030، مستفيداً من كل شعاع شمس يسقط على أرضه، بدءاً من سد الملك طلال وصولا إلى أقصى البادية، لنكمل مسيرة بدأت ببطارية ومروحة في قرية صغيرة، وانتهت بمحطات عالمية تضيء مستقبل البلاد.

## قصة الريادة عبد الجبار العدوان وتحدي "شمس الكفير"

في عام 2010، ومع عودة السيد عبد الجبار العدوان إلى مسقط رأسه في "قرية الكفير" بمحافظة جرش بعد اغتراب دام أربعة عقود في أوروبا، حمل معه فكراً مختلفاً تجاه الطاقة. واجه العدوان تحدياً يتمثل في صعوبة إيصال التيار الكهربائي التقليدي لمنزله رغم حصوله على إذن إشغال، لكن هذا العائق لم يكن المحرك الوحيد؛ بل كانت رغبته في نقل "الثقافة الطاقية" التي عايشها في الدول الأوروبية هي الدافع الأكبر.

**التحديات التقنية والحلول المبتكرة**

بدأ العدوان تجربته في وقت كانت فيه الأنظمة الشمسية في الأردن نادرة ومكلفة. واجه في البداية مشكلة "الاستمرارية" خلال أيام الشتاء والمناطق المرتفعة في جرش، حيث حدث نقص بسيط في التزويد خلال أيام الغيوم. ولأنه كان يعمل بنظام منفصل عن الشبكة (Off-Grid)، قام بتطوير نظامه ذاتياً عبر

**1. زيادة سعة التخزين:** إضافة المزيد من البطاريات لتأمين الطاقة ليلاً وفي الأيام الغائمة.

**2. النظام الهجين:** تركيب مروحة هوائية (طاقة رياح) لتتكامل مع الألواح الشمسية، وهو ما عكس رؤية هندسية متقدمة في ذلك الوقت.

**الأثر المنزلي والبيئي**

تحول منزل العدوان إلى نموذج حي للاكتفاء الذاتي؛ حيث أثبت أن طاقة الشمس المجانية قادرة على تلبية كافة الاحتياجات المنزلية دون الاعتماد على الشبكة العامة، مما وفر عليه تكاليف باهظة وحمى البيئة من الانبعاثات الكربونية.

## السياق التاريخي والتشريعي من 1985 الى الانطلاقة الكبرى

بينما كانت تجربة العدوان تمثل الجانب الفردي، كانت الدولة الأردنية تمتلك جذوراً قديمة في هذا المجال تعود إلى عام 1985، حين نُفذ أول مشروع ريادي للخلايا الشمسية في لواء الأزرق لضخ المياه من الآبار الارتوازية لسقاية المواشي، وهو ما أثبت جدواه الاقتصادية مبكراً؛ حيث بلغت تكلفة المتر المكعب من المياه المسحوبة بالشمس (10-17 قرشاً) مقابل (25 قرشاً) باستخدام الديزل.

### عقبات ما قبل 2014

رغم هذه النجاحات المبكرة، ظلت الطاقة الشمسية في الأردن تواجه عوائق حتى عام 2010، لعدة أسباب استخلصناها من دراسات تلك الفترة

1. **التكلفة الرأسمالية العالية:** غياب الدعم الحكومي المباشر للمواد الأولية للخلايا مقارنة بالنماذج الأوروبية.

2. **التغطية الشاملة:** وصول الشبكة الكهربائية لـ 99% من السكان قلل من دافع البحث عن بدائل.

**3.غياب التشريعات:** لم تكن هناك قوانين تسمح للمواطن ببيع فائض الطاقة لشركة الكهرباء أو ربط نظامه بالشبكة (On-Grid).

**النقلة النوعية وبروز الصناعة الوطنية**

بدءاً من عام 2012، ومع صدور قانون الطاقة المتجددة وترشيد الطاقة رقم (13)، بدأت ملامح التغيير الجذري. هذا القانون مهد الطريق لظهور شركات وطنية أدركت مبكراً أن الأردن يمتلك "منجماً ذهبياً" من الإشعاع الشمسي.

**إشارة إلى شركة فيلادلفيا للطاقة الشمسية**

في خضم هذا التحول، برزت شركة فيلادلفيا للطاقة الشمسية كأول شركة في المنطقة تبدأ بتوطين التكنولوجيا وتصنيع الألواح محلياً. كانت فيلادلفيا حلقة الوصل التي نقلت الأردن من مرحلة الاستيراد إلى مرحلة التصنيع، مما ساهم في خفض التكاليف الأولية التي كانت تعيق المواطنين، وهيأت الأرضية للمشاريع الكبرى التي سنناقشها في الفصول القادمة.

**توثيق الأثر الاقتصادي (أرقام وحقائق)**

**1. المباني الحكومية:** أشارت دراسات عام 2009 إلى أن ترشيد الطاقة واستخدام البدائل في المباني الحكومية

قادر على توفير 20% من إجمالي فاتورة الطاقة السنوية.

**2. الجدوى المالية:** الفرق الواضح بين تكلفة الديزل والطاقة الشمسية في ضخ المياه (توفير يصل لـ 50%) كان هو المحرك الأساسي لإقناع القطاع الزراعي بالتحول.

انتقلت التجربة من "مبادرة فردية" مدفوعة بالشغف مثل تجربة عبد الجبار العدوان، إلى "استراتيجية وطنية" مدعومة بالقوانين والتشريعات التي جعلت من الأردن اليوم قائداً إقليمياً في هذا المجال.

## أبرز محطات الطاقة الشمسية في الأردن

يُعد الأردن نموذجاً رائداً في المنطقة في التحول نحو الطاقة النظيفة، حيث استطاع خلال عقد واحد فقط رفع مساهمة الطاقة المتجددة في توليد الكهرباء من مستويات هامشية إلى ما يقارب 27% بحلول عام 2024. هذا التحول لم يكن مجرد استجابة لضغوط بيئية، بل ضرورة استراتيجية لتقليل الاعتماد على الوقود المستورد الذي كان يشكل 87% من فاتورة الطاقة. ومن خلال مشروعات كبرى مثل "بينونة" و"القويرة"، أثبتت المملكة قدرتها على جذب

الاستثمارات الأجنبية وبناء بنية تحتية هندسية متطورة تخدم الأجيال القادمة.

**محطة بينونة للطاقة الشمسية الأيقونة الوطنية**

**القدرة:** 200 ميجاواط (الأكبر في المملكة).

**الإسهام الاقتصادي**

ساهمت في الاستغناء عن استيراد ما يقرب من 104 مليار لتر من النفط الخام سنوياً، مما خفف الضغط على ميزان المدفوعات الأردني.

خفضت تكاليف التوليد بشكل ملحوظ مقارنة بمحطات الوقود الأحفوري التقليدية، مما يساعد شركة الكهرباء الوطنية (NEPCO) على تقليل خسائرها.

**الأثر البيئي**

تمنع انبعاث 360 ألف طن من غاز ثاني أكسيد الكربون سنوياً، وهو ما يعادل إزالة نحو 80 ألف سيارة من الطرقات.

**الملكية:** ائتلاف شركة "مصدر" الإماراتية (70%) وصندوق "Taaleri" الفنلندي (30%).



**صورة (٢٣) محطة بينونة لطاقة الشمسية**

## محطة القويرة للطاقة الشمسية الأثر الحكومي المباشر

**القدرة:** 103 ميجاواط.

**الإسهام الاقتصادي**

تعتبر الأعلى في "القيمة المضافة" للاقتصاد الوطني لأن ملكيتها تعود لوزارة الطاقة؛ مما يعني أن العائد المادي من بيع الكهرباء يذهب مباشرة لدعم الخزينة العامة بدلا من الشركات الخاصة.

ساهمت في إنعاش منطقة القويرة ووادي رم من خلال خلق فرص عمل فنية في الصيانة والتشغيل لأبناء الجنوب.

**الأثر البيئي**

تنتج 227 جيجاواط ساعة سنوياً من الطاقة النظيفة، مما يساهم في الحفاظ على التنوع البيئي في منطقة وادي رم (محمية طبيعية) عبر تقليل الحاجة لخطوط نقل الوقود.

**الملكية:** مملوكة بالكامل للحكومة الأردنية (وزارة الطاقة).

## 3محطة الصفاوي للطاقة الشمسية تنمية البادية. الشمالية

**القدرة**: 66.7 ميجاواط.

**الإسهام الاقتصادي**

عززت من استقرار الشبكة الكهربائية في المنطقة الشمالية، وقللت من الفواقد الفنية الناتجة عن نقل الطاقة لمسافات طويلة.

المشروع وفر تدريباً تقنياً للكوادر الأردنية في محافظة المفرق على أحدث تقنيات الألواح الكهروضوئية.

**الأثر البيئي**

تقليص 107 ألف طن من الانبعاثات الكربونية سنوياً، وتغطية احتياجات 21 ألف منزل بطاقة خالية تماماً من الملوثات.

**الملكية:** شركة "الصفاوي للطاقة الخضراء" (ائتلاف FRV ومودرن أرابيا).



**صورة (٢٤) محطة الصفاوي للطاقة الشمسية**

## محطة شمس معان رائدة الجولة الأولى

**القدرة:** 52.5 ميجاواط.

### الإسهام الاقتصادي

كانت أول مشروع ضخم يثبت جدوى الاستثمار الأجنبي المباشر (FDI) في قطاع الطاقة بالأردن، حيث بلغت استثماراتها نحو 170 مليون دولار.

ساهمت في تحويل محافظة معان إلى "عاصمة الطاقة الشمسية" في الأردن، مما جذب مشاريع تابعة في مجالات الخدمات اللوجستية.

### الأثر البيئي

تمنع انبعاث حوالي 90 ألف طن من الكربون سنوياً، وتستهلك كميات مياه شبه معدومة للتنظيف مقارنة بالمحطات الحرارية التي تستهلك ملايين الأمتار المكعبة للتبريد.

**الملكية:** ائتلاف دولي (نبراس القطرية، ميتسوبيشي اليابانية، وكواسر الأردنية).



**صورة (٢٥) محطة شمس معان لطاقة الشمسية**

## محطة الحسينية للطاقة الشمسية

**القدرة:** 50 ميجاواط.

**الإسهام الاقتصادي**

تستخدم هذه المحطة تقنيات الألواح ثنائية الوجه (Bifacial)، مما يرفع كفاءة الإنتاج بنسبة تصل إلى 15% مقارنة بالألواح التقليدية، وهذا يعني إنتاجية أعلى بنفس المساحة وتكلفة أقل للكيلوواط.

دعم المجتمع المحلي في محافظة معان عبر برامج المسؤولية الاجتماعية التي أطلقتها الشركات المالكة.

**الأثر البيئي**

توفير طاقة نظيفة لأكثر من 50 ألف منزل، مع الالتزام الصارم بالمعايير البيئية الدولية في إدارة النفايات الإلكترونية للألواح.

**الملكية:** شركة "AMEA Power" الإماراتية بالتعاون مع شركاء محليين.



**صورة (٢٦) محطة الحسينية لطاقة الشمسية**

## فيلادلفيا للطاقة الشمسية رائد توطين التكنولوجيا في المنطقة

تأسست الشركة عام 2007 في منطقة القسطل بالعاصمة عمان، برأس مال قدره 25 مليون دولار. ومنذ انطلاقتها، لم تكتفِ فيلادلفيا بدور المستورد، بل كانت سباقة في توطين صناعة الطاقة الشمسية، لتصبح اليوم أول وأكبر مصنع متكامل للألواح الشمسية وهياكل التركيب في المنطقة.

### 1. المحاور التشغيلية والقدرة الإنتاجية

تتميز الشركة بنموذج عمل متكامل يغطي كافة مراحل المشروع (Design to Operation):

**التصنيع المتقدم:** تبلغ القدرة الإنتاجية للمصنع أكثر من 500 ميجاواط سنويًا، مع خطوط إنتاج تعتمد أحدث التقنيات العالمية.

**هياكل التركيب:** تصنيع أنظمة تثبيت فولاذية متينة ومقاومة للعوامل الجوية، مصممة هندسياً لتناسب مختلف التضاريس.

**خدمات الـ EPC:** تعمل كمقاول رئيسي يقوم بالتصميم، التوريد، التركيب، والتشغيل للمحطات الكبرى والصغيرة.

**التكنولوجيا:** إنتاج ألواح شمسية عالية الكفاءة من نوع Mono-facial وألواح Bifacial (ثنائية الوجه) التي تزيد من إنتاجية الطاقة عبر امتصاص الضوء المنعكس.

## 2. التأثير الاقتصادي والبصمة العالمية

تجاوز طموح الشركة الحدود المحلية لتصبح لاعباً دولياً منافساً

**التصدير والانتشار:** تصدر الشركة منتجاتها إلى أكثر من 45 دولة حول العالم، مما يعكس جودة المنتج الأردني ومطابقته للمواصفات العالمية.

**التوسع الدولي:** في خطوة استراتيجية، أنشأت الشركة مصنعاً في الولايات المتحدة الأمريكية، وحصدت جوائز كأفضل علامة تجارية هناك، مما يبرهن على قدرتها التنافسية في أصعب الأسواق.

**المشاريع الاستراتيجية:** تنفيذ مشاريع ضخمة بنظام "الاستجرار" (Wheeling) للقطاع الصناعي بقدرات تتجاوز 135 ميجاواط ذروة، مما يساهم في خفض تكاليف الإنتاج وتعزيز تنافسية الصناعة الوطنية.

## 3. المسؤولية المهنية وتنمية الكوادر

تعتبر فيلادلفيا للطاقة الشمسية حاضنة للخبرات الهندسية، حيث توفر بيئة عمل تخصصية في مجالات حيوية:

**فرص العمل:** استقطاب وتوظيف مهندسي المواقع الكهربائية، مهندسي الإنتاج، مهندسي الصيانة، ومهندسي المبيعات التقنية.

**التدريب والتطوير:** الاستثمار في تدريب الكوادر المحلية على أحدث برمجيات المحاكاة وتقنيات التركيب، مما يرفع من سوية المهندس الأردني في المحافل الدولية.

**دعم المنتج المحلي:** حملها لعلامة "صنع في الأردن" يعزز الثقة في الصناعات الهندسية المحلية ويحفز الاقتصاد الوطني.

ما يجعل فيلادلفيا للطاقة الشمسية فريدة من نوعها هو تقديمها لـ "حلول الطاقة الشاملة". فهي لا تبيع لوحاً شمسياً فحسب، بل توفر نظاماً هندسياً متكاملاً يبدأ من التصنيع وينتهي بالتشغيل والصيانة، مما يضمن أعلى مستويات الاستدامة والموثوقية للمستثمرين في قطاع الطاقة.




**صورة (٢٦) شركة فيلادلفيا لطاقة الشمسية**

## ابتكارات رائدة آفاق أردنية ترسم مستقبل الطاقة المتجددة

شهد عام 2025 وما قبله قفزة نوعية في الابتكارات العربية الهادفة لتعزيز استقلالية الطاقة وإيجاد حلول جذرية للتحديات المناخية والجغرافية. نستعرض فيما يلي أبرز هذه الابتكارات التي تجمع بين كفاءة التصميم وعبقرية التنفيذ

### 1. نظام "إيريس" (IRIS): الطاقة كحق للجميع

**المبتكر:** الباحث الأردني طارق حمدان.

**التكريم:** جائزة "الابتكار والتكنولوجيا" في ملتقى الصنّاع الأردنيين 2025.

**مبدأ العمل**

يعتمد نظام "إيريس" على فلسفة أن الحلول الكبرى تبدأ من مبادرات الأفراد. هو جهاز مصمم ليكون رمزاً لسهولة الوصول إلى الطاقة المتجددة، حيث أشرف على تنفيذه فريق مكون من 25 مهندساً ومهندسة على مدار عامين من العمل المتواصل.

**الحالة الراهنة**

المشروع ملكية خاصة للمبتكر، وهو حالياً في طور الحصول على الموافقات الرسمية النهائية لطرحه في الأسواق كمنتج تجاري يضع الأردن على خارطة الابتكار العالمي.




**صورة (٢٧) نظام آيريس**

## 2. المجمع الشمسي ذو البؤرة الثابتة: ثورة في تخزين الحرارة

**المبتكر:** المخترع الأردني أيمن المعايطة.

التعاون الدولي: اتفاقية تقييم مع معهد "مصدر" (جامعة خليفة - الإمارات).

**مبدأ العمل**

عبارة عن مُجمع للطاقة الشمسية يتميز بتصميم فريد حيث يدور القرص الشمسي طوال اليوم لملاحقة الأشعة، بينما تظل النقطة البؤرية ثابتة على الأرض.

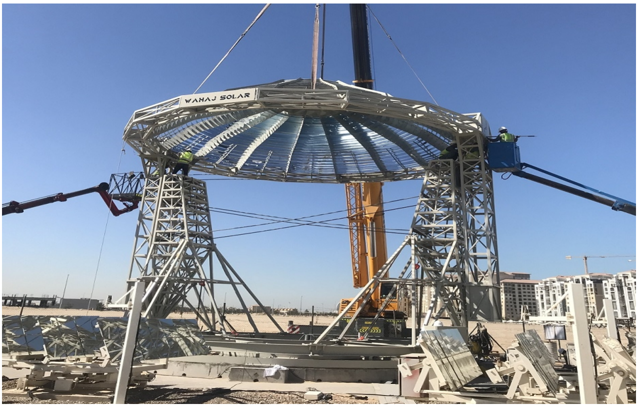
**المميزات التقنية**

درجات حرارة قياسية: يمكنه توليد حرارة تصل إلى أكثر من 1500 درجة مئوية.

**تخزين طاقة مبتكر:** يتم تخزين الطاقة الحرارية عن طريق تسخين أحجار البازلت والسيراميك، مما يسمح بإعادة استخدامها لتوليد الكهرباء على مدار الساعة.

**الكفاءة والمساحة:** يحتاج الجهاز إلى ربع المساحة التي تتطلبها الألواح التقليدية، وبكلفة إنتاج تقل عن النصف.

**الحماية القانونية:** الاختراع محمي بأربع براءات اختراع ومسجل في الولايات المتحدة، و32 دولة أوروبية، و150 دولة حول العالم.




**صورة (٢٨) المجمع الشمسي ذو البؤرة الثابتة**

## 3. تقنية "سولار بيزوكلين": الحل الذكي لغبار الصحراء

**التحدي:** فقدان الخلايا الشمسية لـ 30% إلى 50% من فعاليتها بسبب تراكم الغبار في البيئات الصحراوية.

**مبدأ العمل**

ابتكار "سولار بيزوكلين" يقدم حلا آلياً وعملياً لتنظيف الألواح الشمسية دون الحاجة إلى تدخل بشري ضخم أو تكاليف صيانة مرتفعة.

**الأثر الاقتصادي**

الحفاظ على أقصى مردود للخلايا الشمسية بأقل وقت وجهد.

تقليل الاعتماد على الكوادر البشرية في المجمعات الشمسية الكبرى.

مثالي للمنطقة العربية التي تستقبل طاقة شمسية تصل إلى 5 كيلوواط/ساعة في المتر المربع الواحد يومياً.

تؤكد هذه الابتكارات أن المنطقة العربية ليست مجرد مستهلك للتكنولوجيا، بل هي منتج لحلول نوعية تعالج مشاكل التخزين، المساحة، وظروف الطقس القاسية،

مما يمهد الطريق لسيادة كاملة في قطاع الطاقة الخضراء.




صورة (٢٩) تقنية سولار بيزوكلين

## الإطار التشريعي والقانوني للطاقة الشمسية في الأردن

لقد شكلت القوانين والأنظمة العمود الفقري لنجاح تجربة الأردن في التحول الطاقي، حيث تميزت بالمرونة والقدرة على تحفيز الاستثمار في القطاعين الخاص والعام. ويمكن تصنيف هذه التشريعات وفق التسلسل الآتي:

### 1. التشريعات السيادية (القوانين الأساسية)

**قانون الطاقة المتجددة وترشيد الطاقة رقم (13) لعام 2012 وتعديلاته**

يعد الحجر الأساس الذي سمح بفتح السوق للمنافسة، حيث أوجد مفهوم "العروض المباشرة" (Direct Proposals) للمشاريع الكبرى.

**تعديلات 2014 و2024:** ركزت هذه التعديلات على تعزيز الاستهلاك الذاتي، وفرضت إعفاءات ضريبية وجمركية كاملة (بنسبة 0%) على كافة أنظمة ومعدات الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة، مما أدى إلى انخفاض حاد في فترات استرداد التكاليف (Payback Period).

**قانون الكهرباء العام لعام 2025 (المرحلة الجديدة)**

يمثل نقلة نوعية من خلال مأسسة قطاع تخزين الطاقة (Energy Storage)، حيث وضع الأطر القانونية لربط البطاريات العملاقة بالشبكة الوطنية لمواجهة تحديات "الاستقرارية" وتذبذب الإنتاج.

يسهل القانون الجديد إجراءات الربط البيني ويعزز مفهوم الشبكات الذكية (Smart Grids).

**قانون الاستثمار رقم (30) لعام 2014**

منح مشاريع الطاقة المتجددة صفة "المشاريع الاستراتيجية"، مما يضمن للمستثمر تسهيلات إدارية

وسرعة في منح التراخيص، بالإضافة إلى حماية الاستثمارات الأجنبية.

## 2. الأنظمة التنظيمية والآليات الفنية

### نظام صافي القياس (Net Metering)

هو المحرك الرئيسي لقطاع المنازل والمساجد والمنشآت الصغيرة، حيث يسمح للمستهلك بتصدير الفائض من إنتاجه إلى الشبكة واسترداده في وقت اللاحق، مما يحول المستهلك إلى "منتج ومستهلك" (Prosumer) في آن واحد.

### نظام العبور (Wheeling)

أتاح للمنشآت الصناعية والتجارية الكبرى توليد الطاقة في موقع جغرافي (حيث تتوفر الأراضي والإشعاع القوي) واستهلاكها في موقع آخر (مثل المصانع داخل المدن) مقابل دفع رسوم عبور محددة لشركة الكهرباء.

### نظام تنظيم ربط منشآت مصادر الطاقة المتجددة (2024)

يحدد المعايير الفنية الصارمة لضمان عدم تأثر جودة التيار الكهربائي في الشبكة العامة نتيجة ربط الأنظمة الشمسية، وينظم عملية تركيب العدادات الذكية ثنائية الاتجاه.

### 3. الجودة والرقابة (هيئة تنظيم قطاع الطاقة والمعادن)

**تعليمات ترخيص العاملين:** لا يسمح لأي جهة بالعمل في تصميم أو تركيب أو صيانة الأنظمة إلا بعد الحصول على رخصة رسمية من الهيئة، مما يضمن كفاءة الأنظمة وسلامة المستخدمين.

**كودات الربط (Grid Codes):** تحدد الاشتراطات الهندسية الدقيقة لمطابقة الأنظمة الشمسية مع متطلبات الشبكة الوطنية.

### 4. الأذرع التنفيذية والتمويلية

### صندوق الطاقة المتجددة وترشيد الطاقة (JREEEF)

يعتبر الذراع التنفيذي لوزارة الطاقة، حيث يلعب دوراً حيوياً في تقديم الدعم المالي المباشر أو تيسير القروض الميسرة بالتعاون مع البنوك التجارية، خاصة للفئات المنزلية والمنشآت الصغيرة والمتوسطة (SMEs).

# الأثر الاقتصادي والتنموي للتحول الطاقي في الأردن (2000 - 2026)

شهد الأردن تحولا دراماتيكياً في ملف الطاقة، حيث انتقل من دولة تعتمد بنسبة 97% على الاستيراد، إلى دولة رائدة إقليمياً تصدر الخبرات والكهرباء الخضراء.

## 1. التسلسل الزمني لتطور القدرة المركبة والإنتاج

الفترة الزمنية الحالة والمرحلة التاريخية القدرة التراكمية (تقريبي)

**2000 - 2011 مرحلة المحاولات الفردية** اقتصرت على السخانات الشمسية وبعض التطبيقات الريفية البسيطة. < 5 ميجاواط

**2012 - 2015 مرحلة التأسيس التشريعي صدور قانون 2012**

بدء جولات العروض المباشرة. ~ 100 ميجاواط

**2016 - 2020 مرحلة الطفرة الكبرى:** دخول محطات ضخمة (شمس معان، بينونة) والبدء بنظام العبور والصافي. ~ 1500 ميجاواط

**2021 - 2024 مرحلة النضج:** الأردن يتصدر المرتبة الأولى عربياً في نسبة المساهمة (27%). ~ 3000 ميجاواط

**2025 - 2026 مرحلة التخزين والهيدروجين** التركيز على البطاريات، والربط الإقليمي، والإنتاج الأخضر. > 3500 ميجاواط

**2. الأثر الاقتصادي (بالأرقام والبيانات)**

**جذب الاستثمارات الأجنبية**

نجح الأردن في استقطاب استثمارات ضخمة تجاوزت 4 مليارات دولار بين عامي 2013 و2023، معظمها استثمارات أجنبية مباشرة (FDI) في مشاريع الطاقة الشمسية والرياح، مما عزز من احتياطي العملات الصعبة.

**خفض تكلفة الإنتاج والخدمات**

**القطاع الصناعي:** وفرت الشركات الصناعية ما بين 30% إلى 60% من قيمة فاتورة الكهرباء عبر نظام "العبور"، مما رفع تنافسية المنتج الأردني عالمياً.

**المؤسسات العامة:** تم تركيب أنظمة لأكثر من 500 مسجد وكنيسة، ومئات المدارس الحكومية، مما خفف العبء عن الموازنة العامة للدولة.

**تخفيض فاتورة الاستيراد:** ساهمت الطاقة المتجددة في خفض استهلاك الوقود الأحفوري (الغاز والنفط) لتوليد الكهرباء، مما وفر على خزينة الدولة مئات الملايين من الدنانير سنوياً كانت تذهب للخارج.

### 3. الأثر التنموي والبيئي (البصمة الخضراء)

**الريادة العالمية:** احتل الأردن المرتبة الأولى في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا والمرتبة 15 عالمياً في مساهمة الطاقة الشمسية والرياح في توليد الكهرباء (حسب تقرير Climatescope).

**الوظائف الخضراء:** خلق القطاع آلاف فرص العمل المتخصصة في الهندسة، والتركيب، والصيانة، والتصنيع (كما في مصنع فيلادلفيا للطاقة).

**الحد من الانبعاثات:** ساهمت المشاريع في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمعدل 3.3 مليون طن سنوياً، وهو ما يعادل زراعة ملايين الأشجار، مما يدعم التزامات الأردن في اتفاقية باريس للمناخ.

### 4. العوامل التي مكنت هذا التحول

**صندوق تشجيع الطاقة المتجددة (JREEEF):** لعب دوراً محورياً في دعم المنازل والمنشآت الصغيرة عبر

برامج دعم تصل إلى 30% من الكلفة وقروض ميسرة.

**الشراكات الدولية:** نجاح محطة بينونة (200 ميجاواط) وغيرها من المشاريع الكبرى عزز ثقة الممولين الدوليين (مثل مؤسسة التمويل الدولية IFC) في السوق الأردني.

**التنمية الريفية:** ساهمت الشبكات الصغيرة (Mini-grids) في توفير طاقة مستدامة للمزارع في مناطق الأغوار والمناطق النائية، مما دعم الأمن الغذائي.

## الرؤية الملكية للطاقة الشمسية الأردن مركزاً إقليمياً للاقتصاد الأخضر

لم تكن تجربة الأردن في الطاقة الشمسية مجرد استجابة لضغوط اقتصادية، بل كانت ترجمة لنهج ملكي استباقي يقوده جلالة الملك عبدالله الثاني ابن الحسين، يهدف إلى تحويل التحديات الطاقية إلى فرص تنموية مستدامة، مستفيداً من الموقع الجغرافي الفريد للمملكة الذي يتمتع بواحد من أعلى معدلات الإشعاع الشمسي عالمياً.

## 1. المرتكزات الاستراتيجية للرؤية الملكية

تستند رؤية جلالة الملك إلى ثلاثة محاور رئيسية أحدثت التغيير المنشود

**1. السيادة الطاقية (Energy Sovereignty):**السعي لتقليل الاعتماد على المصادر الخارجية وتأمين طاقة وطنية مستدامة تعزز استقلال القرار الاقتصادي.

**2. النمو الأخضر والوظائف:** النظر إلى قطاع الطاقة المتجددة كرافعة لخلق "وظائف خضراء" للشباب الأردني المتخصص، وتحفيز الابتكار التقني.

**3.الريادة الإقليمية:** وضع الأردن كمنصة لتصدير الطاقة النظيفة والخبرات الهندسية إلى دول الجوار، وهو ما تبلور مؤخراً في مشاريع الربط الكهربائي وتصدير الكهرباء الخضراء.

## 2. توجيهات وأقوال جلالة الملك عبدالله الثاني

تعكس كلمات جلالته فلسفة "الاستدامة" كنهج حياة وليس مجرد خيار تقني

"إن مقياس نجاح الاستثمارات يجب ألا يقتصر على المكاسب المالية فحسب، بل يجب أخذ الأثر البيئي

والاستدامة بعين الاعتبار أيضاً، لأنها مسؤوليتنا المشتركة لتبقى الأرض وطناً مستداماً ونابضاً بالحياة."

"على الحكومة أن تضع الأطر المؤسسية التي تضمن أعلى درجات التنسيق في إدارة المشاريع والاستثمار فيها، وخصوصاً في قطاع الطاقة البديلة، لضمان مستقبل آمن لأجيالنا القادمة."

## 3. محطات فارقة وإنجازات (مضافة ومحدثة لعام 2026)

بالإضافة إلى ما ذكرت، هناك إنجازات نوعية تمت بتوجيهات مباشرة

**مشروع الطاقة الشمسية في الديوان الملكي الهاشمي:** كان جلالته القدوة ببدء التحول من "بيت الأردنيين"، حيث تم إنشاء محطة شمسية تغطي احتياجات الديوان، ليكون أول مؤسسة سيادية في المنطقة تعتمد على الطاقة النظيفة.

**محطة "بينونة" (مفخرة الصناعة):** تدشين المحطة بقدرة 200 ميجاواط، والتي تعتبر من أضخم المشاريع التي تعكس الشراكة الاستراتيجية مع الأشقاء في الإمارات (شركة مصدر).

**مبادرات المدارس والمساجد:** بتوجيه ملكي، تم إطلاق برامج لتركيب أنظمة شمسية لأكثر من 500 مدرسة

ومئات المساجد والكنائس لخفض كلف التشغيل وتوجيه الوفر لصالح جودة التعليم والخدمات.

**الوصول إلى 31% بحلول 2026:** تجاوز الأردن الهدف الأولي (10%)، وبتوجيهات ملكية مستمرة، يسعى الأردن الآن للوصول إلى مساهمة تزيد عن 31% من الطاقة المتجددة في خليط الكهرباء الكلي بحلول نهاية عام 2026.

**4. الأثر التنموي للرؤية الملكية**

لم يقتصر الأثر على الأرقام، بل امتد ليشمل

**جذب الاستثمارات العالمية:** ثبات الرؤية السياسية والتشريعية جعل الأردن بيئة آمنة لكبرى شركات الطاقة العالمية.

**توطين المعرفة:** تشجيع المصانع المحلية (مثل فيلادلفيا للطاقة) لتكون جزءاً من سلسلة التوريد العالمية.

**التعامل مع التغير المناخي:** وضع الأردن في مقدمة الدول التي تفي بالتزاماتها الدولية، مما سهل الحصول على منح وتمويلات "خضراء" من المؤسسات الدولية.



**صورة (٣٠) الملك عبدالله الثاني**

## الرؤية المستقبلية استدامة الشمس

انطلاقاً من الرؤى الاستشرافية لجلالة الملك عبد الله الثاني ابن الحسين وتوجيهاته السامية بضرورة الاستثمار في الموارد الوطنية المستدامة، يخطو الأردن اليوم بخطى واثقة نحو ريادة قطاع الطاقة المتجددة في المنطقة. لم تكن الرؤية الملكية مجرد استجابة لتحديات الطاقة، بل كانت "خارطة طريق" متكاملة تهدف إلى

تحويل الأردن من بلد مستورد للطاقة إلى مركز إقليمي لتصدير الطاقة الخضراء والحلول المستدامة.

بناءً على رؤية التحديث الاقتصادي والخطط الاستراتيجية الممتدة من 2026 إلى 2030، استطاع الأردن تحويل التحديات الجغرافية والاقتصادية إلى قصص نجاح عالمية. فمن خلال الخبرات الوطنية المتراكمة والشراكات مع كبرى الشركات العالمية، أصبح الأردن يمتلك اليوم "مختبراً حياً" للمشاريع العملاقة التي أثبتت كفاءتها على أرض الواقع.

ومع دخولنا هذه المرحلة الحاسمة من عمر الاستراتيجية الوطنية، يبرز التساؤل الجوهري

"كيف سيكون شكل المشهد الطاقي في الأردن بعد نضوج هذه التوجيهات الملكية؟ وكيف ستساهم الخبرات العالمية المكتسبة والمشاريع الرائدة التي نُفذت في إعادة صياغة مستقبل الاقتصاد الوطني، وتحويل الأردن إلى أيقونة عالمية في التنمية المستدامة والابتكار الطاقي بحلول عام 2030؟"

## (2030) - (2026) الرؤية والطموحات

تستند الرؤية إلى الاستراتيجية الشاملة لقطاع الطاقة 2020-2030، والتي جرى تحديث طموحاتها مؤخراً لتكون أكثر جسارة:

الهدف المحدث: رفع مساهمة الطاقة المتجددة (وعلى رأسها الشمسية) في توليد الكهرباء إلى 50% بحلول عام 2030، بدلا من الهدف السابق الذي كان 31%.

**تصفير الانبعاثات:** الالتزام بخفض انبعاثات الغازات الدفيئة بنسبة 31% بحلول 2030.

**التحول نحو الهيدروجين الأخضر:** تهدف الرؤية لجعل الأردن مركزاً إقليمياً لإنتاج الهيدروجين الأخضر، مستفيداً من رخص تكلفة الطاقة الشمسية لديه، مع استهداف إنتاج 0.5 مليون طن سنويًا بحلول 2030.

## التحديات الاستراتيجية والحلول المقترحة

واجه القطاع "فترة تجميد" للمشاريع الكبرى (أكبر من 1 ميجاواط) تم رفعها في أواخر 2024، لتبدأ مرحلة الحلول التقنية:

### 1. تحدي استقرار الشبكة (Grid Stability)

**المشكلة:** عدم قدرة الشبكة التقليدية على استيعاب التدفق المتذبذب للطاقة الشمسية.

**الحل:** التحول نحو الشبكات الذكية (Smart Grids)، وتوسيع قدرة الشبكة الوطنية عبر شركة الكهرباء الوطنية (NEPCO).

### 2. تحدي التخزين (Storage)

**المشكلة:** فائض الإنتاج نهاراً والحاجة إليه ليلاً.

**الحل:** البدء بمشاريع تخزين الطاقة بالبطاريات (BESS)، ودراسة مشاريع التخزين عن طريق ضخ المياه (Pumped Storage) في السدود.

### 3. التحدي الجغرافي والربط الدولي

**المشكلة:** تركز الإنتاج في الجنوب والشرق بعيداً عن مراكز الاستهلاك الكبرى في الوسط والشمال.

**الحل:** تعزيز الربط الكهربائي مع دول الجوار (مصر، العراق، السعودية) لتصدير الفائض، وتحويل الأردن لممر طاقة إقليمي.

## خارطة الشركات والفاعلين في السوق

تهيمن عدة كيانات كبرى على المشهد، مع بروز دور القطاع الخاص

**القطاع الحكومي المنظم:** وزارة الطاقة والثروة المعدنية، هيئة تنظيم قطاع الطاقة والمعادن (EMRC).

**الشركات المشغلة والمنفذة**

**شركة "أكوا باور" (ACWA Power):** تدير مشاريع كبرى مثل مشروع "الريشة".

**شركة "مصدر" (Masdar):** عبر مشروع "بينونة" (أكبر مشروع طاقة شمسية في الأردن بقدرة 200 ميجاواط).

**الشركات المحلية:** بروز شركات هندسة وتوريد (EPC) أردنية قوية بدأت تصدر خبراتها للخارج.

المشاريع الجديدة: الإعلان عن مشاريع بقدرة 800 ميجاواط شمسية و 2 جيجاواط رياح دخلت حيز التخطيط الفعلي لعام 2026.

# الخاتمة

في ختام رحلتنا بين فصول هذا الكتاب، نكون قد أتممنا جولة معرفية شاملة، حاولنا من خلالها الإحاطة بنشأة هذا المجال بكافة مراحله؛ حيث غصنا في الجذور التاريخية التي بدأت منها علاقة الإنسان بالشمس، وكيف تطورت تلك العلاقة من مجرد ملاحظة فطرية إلى علم هندسي متكامل. لقد تتبعنا معاً بداية تطور الطاقة الشمسية عبر مساريها المتوازيين: المسار الحراري الذي استغل حرارة الشمس المباشرة، والمسار الضوئي (الفوتوفولتية) الذي أحدث الثورة الكهربائية التي نعيشها اليوم.

إن استعراضنا لـ تجارب الدول الرائدة في هذا المجال لم يكن مجرد سرد للنجاحات العالمية، بل كان لاستخلاص الدروس وربطها بالواقع المحلي. ومن هنا، انتقلنا لتسليط الضوء على الريادة الأردنية؛ هذا النموذج العربي والمنطقة الذي استطاع، بتوفيق من الله ثم بـ الرؤية الملكية السامية لجلالة الملك عبد الله الثاني، أن يحجز مكانه في مقدمة الصفوف. لقد أثبت الأردن أن "الريادة" ليست مجرد امتلاك للموارد، بل هي حسن إدارة، وخبرات وطنية فذة، وطموح لا يتوقف عند حدود 2026، بل يمتد لتحقيق أهداف رؤية 2030 بصلابة واقتدار.

لقد كانت هذه الرحلة محاولة مخلصة لتغطية تطور هذا القطاع من أصوله وجذوره إلى واقعه الأردني المشرق. ونحن اليوم، كمهندسين ومتخصصين، نحمل مسؤولية إكمال هذا البناء، مستندين إلى إرث الماضي وعظمة التجارب العالمية، لنصل بالأردن إلى أن يكون منارة للطاقة الخضراء، متمسكين بالأمل والعمل والابتكار، لتظل شمسنا مصدراً أبدياً للعطاء والسيادة.

# المراجع


الكتب العلمية والتاريخية (Books)
La Chaleur solaire et ses applications .Mouchot, Augustin (1869)
industrielles

Contributions to the Centennial Exhibition .Ericsson, John (1888)

A Golden Thread: 2500 Years of Solar .Butti, K., & Perlin, J. (1980)
Architecture and Technology

Let It Shine: The 6,000-Year Story of Solar .Perlin, John (2014)
Energy

Solar Cells and Their .Fraas, L. M., & Partain, L. D. (2010)
Applications

Physics of Semiconductor Devices .Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006)

The Physics of Solar Cells .Nelson, Jenny (2003)

The History of Solar Energy: From the Lab to the .Smith, L. (1995)
Grid

الأبحاث العلمية والأوراق البحثية (Scientific Journals & Papers)

Über einen die Erzeugung und" .Einstein, Albert (1905)
Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen
Gesichtspunkt". (بحث آينشتاين التاريخي حول التأثير الكهروضوئي).

A New Silicon" .Chapin, D. M., Fuller, C. S., & Pearson, G. L. (1954)
P-N Junction Photocell". (الورقة العلمية الأصلية لاختراع الخلية السيليكونية).

Mémoire sur les effets électriques produits" .Becquerel, E. (1839)
sous l'influence des rayons solaires" (وثيقة ولادة العلم الكهروضوئي).

"On a New Form of Selenium Cell" .Fritts, C. E. (1883). (وصف أول خلية
شمسية صلبة).

The Generation of Mechanical Power from .Shuman, Frank (1914)
Solar Heat. (تفاصيل محطة المعادي التاريخية).

,The Solar Revolution in India: Policy" .S. Kumar & K. Tyagi (2021)
.Barriers, and Success". Journal of Clean Energy

Journal of Solar Energy Materials: "Advancements in N-type
Bifacial modules in Indian Deserts". (دراسات حول الألواح ثنائية الوجه).

**Journal of Cleaner Production: "Impact of TOPCon and Perovskite technologies on manufacturing"**

**التقارير الدولية والمنظمات العالمية (International Reports)**

**International Energy Agency (IEA).**

**World Energy Outlook 2025/2026.**

**Renewables 2025: Analysis and Forecast to 2030.**

**Germany 2025: Energy Policy Review.**

**International Renewable Energy Agency (IRENA):**

**Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2025.**

**Renewable Energy Readiness Assessment: Jordan.**

**World Bank Reports: تقارير "المهمة 300" وتأثير الطاقة الشمسية على التنمية في آسيا.**

**BloombergNEF: Energy Transition Investment Trends 2026.**

**Wood Mackenzie: Solar PV Supply Chain Briefing 2026.**

**المراجع الحكومية والوطنية (Governmental & Official Sources)**

**المملكة الأردنية الهاشمية:**

**وزارة الطاقة والثروة المعدنية (MEMR): التقارير السنوية (2020-2025) والاستراتيجية الشاملة 2020-2030.**

**هيئة تنظيم قطاع الطاقة والمعادن (EMRC): إحصائيات الربط، القدرة المركبة، وبيانات الرخص.**

**شركة الكهرباء الوطنية (NEPCO): التقارير السنوية لتفاصيل الطاقة المشتراة.**

**صندوق تشجيع الطاقة المتجددة (JREEEF): بيانات الأثر المجتمعي.**

**جمهورية الهند:**

**Ministry of New and Renewable Energy (MNRE): التقارير السنوية وتقدم سير العمل في مجمع "خافدا".**

**جمهورية ألمانيا الاتحادية:**

**Federal Network Agency (Bundesnetzagentur): بيانات دمج الشبكات والأنظمة اللامركزية.**

مراكز الأبحاث والأرشيف (Research Institutes & Archives).

Fraunhofer Institute (ISE): تقارير توليد الكهرباء في ألمانيا ودراسات الحياد الكربوني 2045.

National Renewable Energy Laboratory (NREL): أرشيف تطور الأنظمة الكهروضوئية وخرائط كفاءة الخلايا.

Smithsonian Institution Archives: التقارير التاريخية المحفوظة.

Bell Labs Record: أرشيف مختبرات بل حول "البطارية الشمسية" (1954-1955).

Mordor Intelligence (2026): تحليل حجم سوق الطاقة في الهند.

الصحافة المتخصصة وتقارير الشركات (Trade Press & Industry Updates)

Scientific American (1913): وصف محطة شومان في المعادي بمصر.

منصة "الطاقة" الدولية (Attaqa): تحديثات قطاع الطاقة في الأردن والوطن العربي لعام 2026.

Adani Green Energy Ltd (AGEL): التحديثات التشغيلية لعام 2026.

ET EnergyWorld: تقارير حول ثورة التخزين ومناقصات BESS.

وكالة الأنباء الأردنية (بترا): بيانات الاستثمار والمشاريع الوطنية الأردنية.

قناة المملكة: تقارير ميدانية حول الأثر الاقتصادي في الأردن.



ISBN
9 789923 025376